

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»  
Академия электротехнических наук Российской Федерации

**МАТЕРИАЛЫ**  
Международной научно-технической конференции  
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»**

(XIX Бенардосовские чтения)

*посвящена 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса*

**31 мая – 2 июня**

III том  
**Электротехника**

Иваново 2017

В III томе материалов конференции представлены статьи, отражающие результаты научных исследований в области динамики, надежности и диагностики механических систем; методов анализа и синтеза систем управления электроприводами и установками; электромеханики и МЖУ; микроэлектронных и микропроцессорных управляющих устройств и систем; технологии машиностроения; математического моделирования, информационных систем и технологий; мехатронных систем и технологий; релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем.

### **Редакционная коллегия:**

**Тарарыкин С.В.**, ректор, д.т.н., профессор – председатель;

**Тютиков В.В.**, проректор по НР, д.т.н., профессор;

**Шуин В.А.**, каф. АУЭС, д.т.н., профессор;

**Казakov Ю.Б.**, зав каф. ЭМ, д.т.н., профессор;

**Полетаев В.А.**, каф. ТМС, д.т.н., профессор;

**Косяков С.В.**, зав. каф. ПОКС, д.т.н., профессор;

**Колибаба В.И.**, зав. каф. ЭиОП, д.э.н., профессор;

**Бушуев Е.Н.**, д.т.н., профессор каф. ХХТЭ;

**Клюнина С.В.**, начальник УИУНЛ.

ISBN 978-5-00062-239-1  
ISBN 978-5-00062-242-1 (Т. 3)

© ФГБОУВО «Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина», 2017.

## СЕКЦИЯ 3. «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»

УДК 004.942

Д.С. СЕНИН<sup>1</sup>, магистрант,  
Л.Н. БУЛАТОВ<sup>2</sup>, к.т.н., начальник отдела

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: white.lord.mane@gmail.com<sup>1</sup>, bulatovleo@gmail.com<sup>2</sup>*

### Повышение эффективности организации учебного процесса на основе корпоративной базы данных

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы построения системы поддержки принятых решений, а также использования этой системы для выработки мероприятий по повышению эффективности организации учебного процесса.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, корпоративная информационная система, базы данных, критерии оценки эффективности.

D.S. SENIN<sup>1</sup>, master-degree student,  
L.N. BULATOV<sup>2</sup>, candidate of engineering, chief of department

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: white.lord.mane@gmail.com<sup>1</sup>, bulatovleo@gmail.com<sup>2</sup>*

### Enhancing of studying process using corporate database

**Abstract.** Issues of decision support system development are considered, as well as usage of this system to develop list of arrangement to enhance studying process

**Key words:** decision support system, corporate information system, database, effectiveness criteria.

Проблема повышения эффективности организации учебного процесса актуальна для любого учебного заведения, поскольку он является основным производственным процессом в этих организациях. Под эффективностью понимается как повышение качества учебного процесса с целью выпуска более квалифицированных специалистов, так и снижение издержек, связанных с организацией учебного процесса, и, как следствие, улучшение финансового положения образовательного учреждения.

Перспективным подходом является поиск способов повышения эффективности организации учебного процесса путем развития в организации системы поддержки принятия решений (СППР), в основе которой лежит единая корпоративная информационная система. Повышение

эффективности, таким образом, достигается путем анализа бизнес-процессов и результатов деятельности. В общем случае этот процесс можно представить в виде следующей последовательности действий:

- 1) Интеграция и анализ данных;
- 2) Выявление проблемных зон;
- 3) Выработка мероприятий по повышению эффективности.

Информационной основой для СППР является корпоративная база данных (КБД), которая позволяет агрегировать данные для анализа. Развитие КБД в организации дает следующие преимущества:

- 1) Нормализация и унификация бизнес-процессов;
- 2) Унификация событий, инициирующих изменение состояния участников бизнес-процессов;
- 3) Создание общесистемных справочников, используемых во всей организации;
- 4) Ведение статистики событий и состояний.

Правильная организация КБД позволяет развивать СППР исключительно путем анализа накопленной информации, без необходимости дополнительного сбора и ручной обработки данных.

Структура базы данных, лежащая в основе автоматизированной системы управления учебной деятельностью ИГЭУ, разрабатывалась с учетом описанных выше требований [1]. Основные элементы системы можно сгруппировать по следующим пунктам:

- 1) Ведение контингента студентов (взаимодействие с приемной комиссией, учебные приказы, документы об образовании и т.д.);
- 2) Работа с учебными планами (единая база данных учебных планов, семестровые учебные планы);
- 3) Работа с успеваемостью (единая база данных по успеваемости, ведомости успеваемости и т.д.);
- 4) Работа с нагрузкой на преподавателей (расчет кафедральной нагрузки, распределение нагрузки);
- 5) Составление расписания;
- 6) Общесистемные справочники.

В настоящее время в ИГЭУ реализованы пункты 1 и 4, на этапе внедрения находятся пункты 2 и 3. Общесистемные справочники (пункт 6) формируются по мере автоматизации все большего числа бизнес-процессов. Отсутствие в организации единых справочников (справочники дисциплин, аудиторий, должностей и т.п.) связано с низким уровнем общесистемной автоматизации. Подобные справочники требуют наличия строго определенных центров ответственности. Автоматизация бизнес-процессов позволяет облегчить создание таких центров, и, как следствие, обеспечить унификацию терминологии, используемой в организации.

Следующим шагом к развитию СППР является создание методики по повышению эффективности организации учебного процесса. В качестве целевой функций в данной задаче могут выступать как показатели каче-

ства получаемого студентами образования, так и показатели, связанные с финансовыми аспектами деятельности организации. В качестве примера показателей качества образования можно привести: процент трудоустройства выпускников, среднюю заработную плату молодого специалиста, процент сохранности контингента от момента зачисления и до выпуска, средний балл диплома и т.д. Примерами финансовых показателей эффективности организации учебного процесса являются: число часов на ставку преподавателя в год; число студентов на одного преподавателя; доля общего финансирования ВУЗа, уходящая непосредственно на обеспечение организации учебного процесса и т.д. Окончательный список выбранных факторов в значительной степени зависит от того, какая информация может быть собрана в корпоративной базе данных. Выбор факторов, требующих предоставления в СППР дополнительной информации, может значительно увеличить время, необходимое для анализа, тогда как от СППР часто требуется предоставление оперативного решения. Кроме того, нужно отметить, что показатели качества образования и финансовые показатели часто противоречат друг другу, поэтому для принятия взвешенного решения необходимо выбирать достаточное число показателей из обеих групп.

После выбора показателей необходимо определить критерии их оценки. К разновидностям критериев относятся:

- нормативные/усредненные;
- полученные в результате ретроспективного анализа;
- экспертные.

Критерии выбираются в зависимости от выбранных показателей, и могут пересматриваться в ходе анализа результатов мониторинга.

Оценка деятельности ВУЗа по данным показателям может быть обобщена по различным уровням детализации (направления подготовки, кафедры, факультеты, ВУЗ в целом). Мониторинг показателей по разным уровням позволяет провести более полную оценку деятельности.

Результаты мониторинга показателей могут быть основой для выработки мероприятий по повышению эффективности организации учебного процесса. Окончательный список мероприятий вырабатывается экспертами, однако СППР может обеспечить их дополнительной информацией для принятия взвешенного решения. Может быть проведен ретроспективный анализ показателей с целью определения факторов, оказывающих на них наибольшее влияние. Это позволит экспертам выделить ряд обоснованных факторов, влияющих на величину показателей на любом уровне, и выработать предложения для руководства организации с целью повышения показателей эффективности.

Развитие СППР в организации открывает широкие возможности по повышению эффективности бизнес процессов. Ключом к созданию СППР является развитие в организации корпоративной информационной системы, в основе которой лежит правильно спроектированная база данных.

### Литература

1. **Опыт** организации информационно-аналитического сопровождения процесса управления в ИГЭУ / С.В. Тарарыкин, И.Д. Ратманова, Е.Е. Булатова, Л.Н. Булатов, Е.М. Голубицкий // Вестник ИГЭУ: Журнал.— Иваново: ООО "ПресСто".— 2015.— №6. — С.65 – 72.

УДК 004.31

С.А. ДЕМИДОВА<sup>1</sup>, аспирант,  
С.В. КОСЯКОВ<sup>2</sup>, д.т.н., профессор,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: demidova.sv.a@gmail.com<sup>1</sup>, ksv@ispu.ru<sup>2</sup>*

### Метод анализа влияния местоположения потребителей на тариф покупки тепловой энергии

**Аннотация.** В работе предложен метод, основанный на использовании геоинформационных технологий и позволяющий анализировать влияние пространственного расположения каждого потребителя на величину расчетного тарифа на покупку тепловой энергии в регионе. В методе оценивается вклад каждого потребителя в суммарные потери на участках тепловой сети и в суммарную генерируемую мощность. Анализ отношения этих показателей позволяет оценивать, приведет ли подключение или отключение конкретного потребителя к увеличению или уменьшению расчетного тарифа.

**Ключевые слова:** система централизованного теплоснабжения, геоинформационные системы, конечные потребители, тепловая энергия

S.A. DEMIDOVA, PGstudent,  
S.V. KOSYAKOV, Doctor of Engineering, professor  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: demidova.sv.a@gmail.com<sup>1</sup>, ksv@ispu.ru<sup>2</sup>*

### The method for analyzing the consumers location influence on the district heating system efficiency

**Abstract.** The paper suggests a method based on the use of geoinformation technologies. The method allows to analyze the influence of the each consumer spatial location on the calculated tariff value for the purchase of thermal energy in the region. The contribution of each consumer to the total losses on the heat network sections and to the total generated power is evaluated in the method. Indicators ratio analysis allows to assess whether the particular consumer connection or disconnection will lead to an increase or decrease in the calculated tariff.

**Keywords:** district heating systems, geoinformation systems, end-users, thermal energy

Тепловые сети в городах развиваются эволюционно по мере строительства новых зданий, являющихся потребителями тепла и горячей воды. При этом затраты на развитие и дальнейшее содержание сети при подключении новых потребителей существенно зависят от расположения подключаемого объекта. Очевидно, что для удаленных от существующих источников тепловой энергии зданий такие затраты будут существенно выше, чем для тех, которые расположены ближе к источникам. При этом платежи за потребленную энергию определяются по единым для региона тарифам и величина доходов, поступающих от потребителя, зависят только от его мощности. Это приводит к тому, что подключение новых и отключение существующих потребителей сети будет влиять на эффективность использования тепловой сети и на величину тарифа в зависимости от места размещения объекта на территории города.

Расчет экономически обоснованных тарифов на передачу тепловой энергии осуществляется в соответствии с утвержденными правительством РФ методическими указаниями по расчету регулируемых тарифов и цен на электрическую (тепловую) энергию на розничном (потребительском) рынке [1]. Как следует из этих указаний, тариф на передачу тепловой энергии  $T$  (руб./Гкал/час в мес.) в системах централизованного теплоснабжения определяются как отношение необходимой валовой выручки НВВ (руб.) в расчетный период к объему отпускаемой тепловой энергии в тот же период:

$$T = \frac{HBB}{p \cdot M}, \quad (1)$$

где  $p$  – суммарная тепловая нагрузка по совокупности договоров теплоснабжения потребителей тепловой энергии в паре или горячей воде, заключенных с энергоснабжающей организацией на регулируемый период, тыс. Гкал/час;

$M$  – продолжительность периода регулирования, мес.

НВВ включает в частности потери тепловой энергии теплопередачей через теплоизоляционные конструкции трубопроводов и оборудование систем транспорта. В [1] эти потери определяются по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^I q * L_i * \text{бета} \quad (2)$$

где  $q$  – удельные часовые тепловые потери трубопроводов каждого диаметра, определенные пересчетом табличных значений норм удельных часовых тепловых потерь на среднегодовые условия функционирования тепловой сети, подающих и обратных трубопроводов подземной прокладки - вместе, надземной - раздельно, ккал/м.ч;

$L$  – длина трубопроводов участка тепловой сети подземной прокладки в двухтрубном исчислении, надземной - в однотрубном, м;

$\text{бета}$  - коэффициент местных тепловых потерь, учитывающий потери запорной арматурой, компенсаторами, опорами (принимается 1,2 при

диаметре трубопроводов до 150 мм и 1,15 – при диаметре 150 мм и более, а также при всех диаметрах трубопроводов бесканальной прокладки);

$i$  – количество участков трубопроводов различного диаметра.

Поскольку в настоящее время на предприятиях тепловых сетей и в органах городского управления внедряются ГИС, появляется возможность не только рассчитывать тариф, как интегральный показатель для тепловой сети в целом, но и оценить вклад каждого потребителя в его формирование. В рамках проводимых авторами исследований разработан модуль ГИС, позволяющий качественно ранжировать потребителей по величине этого вклада. Для этого предложено ввести и определять средствами ГИС для каждого потребителя показатель удельной удаленности  $K$  (м/ тыс. Гкал/час), который рассчитывается как отношение суммарной длины трубопроводов от источника до потребителя к его нагрузке:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{P}, \quad (3)$$

Данный показатель прямо пропорционален тарифу (1) и качественно отражает вклад каждого потребителя в этот тариф. Низкое значение показателя означает, что наличие данного потребителя приводит к снижению тарифа на передачу тепловой энергии, высокое – к увеличению тарифа. При присоединении к сети новых потребителей расчет такого показателя поможет прогнозировать влияние принимаемого решения на будущую эффективность эксплуатации тепловой сети в целом и на будущую величину тарифа.

Показатель удельной удаленности легко определяется через запросы к пространственной базе данных в среде ГИС. В рамках экспериментов проведен анализ этого показателя для системы централизованного теплоснабжения города Иваново. По данным этого анализа построена тематическая карта распределения эффективных потребителей в городе.

Программная реализация метода анализа выполнена в виде модуля в среде геоинформационной платформы разработки ArcGIS 10.1. С помощью модуля построена серия тематических карт, показывающих области экономически выгодного размещения потребителей разной с различной тепловой нагрузкой.

#### Литература

1. **Приказ** ФСТ России от 06.08.2004 N 20-э/2 (ред. от 14.04.2014, с изм. от 16.09.2014) "Об утверждении Методических указаний по расчету регулируемых тарифов и цен на электрическую (тепловую) энергию на розничном (потребительском) рынке" (Зарегистрировано в Минюсте России 20.10.2004 N 6076).

УДК 004.438

С.С. НОВОСЕЛЬЦЕВА<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
И.И. НОВОСЕЛЬЦЕВ<sup>2</sup>, к.т.н., инженер-программист

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
ООО «ТеконАвтоматика»  
153000 г. Иваново, пер. Подгорный, 5  
E-mail: svsnov@hotmail.com<sup>1</sup>, bdfyy@hotmail.com<sup>2</sup>

## Пути преодоления проблем при кроссплатформенной разработке программных приложений

**Аннотация.** Обозначены некоторые проблемы, возникающие в процессе кроссплатформенной разработки программных приложений, и пути их преодоления.

**Ключевые слова:** разработка программных приложений, кроссплатформенность.

S.S. NOVOSELTSEVA, Candidate of Engineering, docent,  
I.I. NOVOSELTSEV, Candidate of Engineering, software developer

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
Ltd «TeconAutomatica» 153000 Ivanovo, Podgorniy, 5  
E-mail: svsnov@hotmail.com<sup>1</sup>, bdfyy@hotmail.com<sup>2</sup>

## Ways to overcome problems in cross-platform development of software applications

**Abstract.** Identify some of the problems that arise in the process of cross-platform development of software applications and ways to overcome them.

**Key words:** development of software applications, cross-platform.

Необходимость разработки программных приложений, работающих под управлением разных операционных систем, возникает в различных областях современной IT-индустрии. Наиболее очевидно преимущества платформонезависимой реализации приложений проявляются при разработке мобильных приложений: большинство приложений создается сразу для нескольких мобильных платформ, а приложения, созданные изначально для одной платформы, активно портируются на другие. Другая актуальная задача, подразумевающая разработку кроссплатформенных приложений, – проектирование систем автоматизации объектов стратегически важных отраслей, где необходимо выполнять требование открытости исходных кодов на всех уровнях системы автоматизации – ПО устройств, операционных систем, SCADA-систем, драйверов отдельных устройств [1].

Многие кроссплатформенные фреймворки, широко используемые разработчиками ПО в настоящее время, позволяют выполнить сборку

программного кода под различные платформы и получить в результате приложение с естественным для данной платформы графическим интерфейсом [2].

Однако, помимо явных преимуществ кроссплатформенной разработки программного обеспечения по сравнению с нативной, таких как снижение себестоимости проекта и времени работы над ним, разработчики сталкиваются с большим количеством проблем, решение которых зачастую требует значительных усилий, при этом иногда затруднение вызывает обнаружение причины проблемы, а не только поиск путей ее устранения.

Перечислим некоторые проблемы, возникающие в процессе разработки приложений, предназначенных для работы под управлением ОС Windows и Linux, на языке C++ с использованием кроссплатформенной библиотеки Qt. Предлагаемые решения реализованы в проекте ПК СВУ Т5000 «Automation Suit» для платформ Linux и Windows, разрабатываемом ООО «ТекоАвтоматика», г. Иваново (группа компаний «Текон», [www.tecon.ru](http://www.tecon.ru)).

1. Проблемы необходимости реализации программного кода для различных ОС.

Наличие команд, являющихся специфическими для конкретной платформы, приводит к необходимости определения типа целевой платформы и увеличения объема программного кода. При разработке на языке C++ использование макроса `#ifdef` позволяет выполнить реализацию необходимого функционала с учетом особенностей конкретной платформы, например, так:

```
#ifdef WIN32 // сборка для Windows
QFileInfoList getFileInfoList(const QDir& dir)
{
    return    dir.entryInfoList(QStringList()    <<    "*.dll"
                               <<    "*.exe",    QDir::Files,
                               QDir::Name);
}
#else // сборка для Linux
QFileInfoList getFileInfoList(const QDir& dir)
{
    return    dir.entryInfoList(QStringList(""),
                               QDir::Files | QDir::Executable
                               | QDir::NoSymLinks, QDir::Name);
}
#endif
```

2. Проблемы управления памятью, связанные с выделением, инициализацией, освобождением и управлением времени жизни переменных.

Компиляторы C++ для различных операционных систем в целях повышения эффективности кода производят его оптимизацию различными

способами, что приводит к непредсказуемому поведению приложений в плане использования памяти, выделяемой для переменных.

Так, по-разному может быть оптимизирован следующий фрагмент программного кода:

```
{ // начало блока 1
  // некоторые команды
  { //начало блока 2
    int b = 0;
    // некоторые команды
  } //конец блока 2
  // некоторые команды
} //конец блока 1
```

В приведенном примере предполагается, что объявленная переменная `b` не доступна за пределами блока 2, и память, выделенная под нее, уже освобождена. Однако, некоторые компиляторы в данном случае проведут оптимизацию кода, проигнорировав само существование блока 2. Устранение подобной проблемы достигается, например, использованием конструкции:

```
if(true)
  { // содержимое блока 2};
```

3. Различное поведение элементов графического интерфейса (GUI) в приложениях, скомпилированных под разные ОС.

Так, например, отмечается проблема потери фокуса элементами ввода строковых значений при переключении между раскладками клавиатуры (изменения языка ввода). Часть подобных проблем решена написанием дополнительного кода обработки событий элементов GUI. В других случаях возникла необходимость полностью самостоятельно переработать реализацию проблемных элементов.

Перечисленные проблемы являются наиболее очевидными и часто встречающимися. Наличие других проблем, возникающих в процессе разработки кроссплатформенных приложений, обусловлено особенностями реализации принятых стандартов, устанавливающих принципы взаимодействия и поведения компонентов (например, стандарта C++, стандарта TCP/IP и др.). Существующие стандарты реализуются с учетом особенностей платформы, что является источником непредвиденных ситуаций.

### Литература

1. **Материалы саммита ROSS-2016** (Russian Open Source Summit); режим доступа: <https://www.pcweek.ru/foss/article/detail.php?ID=184736>
2. **Шлее М.** Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015.

УДК 004.31

В.А. ЗУЙКОВ<sup>1</sup>, аспирант, А.Ю. КАТАНАЕВ<sup>2</sup>, магистрант,  
И.С. СМІРНОВ<sup>3</sup>, инженер,  
Е.Р. ПАНТЕЛЕЕВ<sup>4</sup>, д.т.н., профессор,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

*E-mail: mysterio@yandex.ru<sup>1</sup>, simohstudent@gmail.com<sup>2</sup>, issmirnoff@gmail.com<sup>3</sup>,  
erp@poks.ispu.ru<sup>4</sup>*

### **Модели, методы и программные средства поддержки пользователей САПР в процессе решения прикладных задач**

**Аннотация.** Разработаны модели, методы и реализующий их комплекс программных средств, обеспечивающий пошаговую регистрацию действий пользователя при решении прикладной задачи в среде САПР в формате файла сценария, экспертизу этого сценария в режиме пошагового воспроизведения и доставку эталонного сценария пользователю.

**Ключевые слова:** автоматизация проектирования, методическая поддержка, обучение через деятельность.

V.A. ZUIKOV<sup>1</sup> postgraduate student, A.Yu. KATANAEV<sup>2</sup> graduate student,  
I.S. SMIRNOV<sup>3</sup>, engineer,  
E.R. PANTELEEV<sup>4</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

*E-mail: mysterio@yandex.ru<sup>1</sup>, simohstudent@gmail.com<sup>2</sup>, issmirnoff@gmail.com<sup>3</sup>,  
erp@poks.ispu.ru<sup>4</sup>*

### **Models, methods and software tools for supporting CAD users in the process of solving application problems**

**Abstract.** Models, methods and a software complex implementing them are developed, providing step-by-step registration of user actions when solving an applied task in the CAD environment in the script file format, examining this scenario in the step-by-step playback mode, and delivering the reference scenario to the user.

**Keywords:** design automation, application support, learning by doing.

Результаты исследований в области интеграции инженерной теории с практикой в американском [1], французском [0] и российском образовании [3, 4] позволяют утверждать, что погружение в практику решения профессиональных задач в среде САПР является наиболее эффективным способом обучения инженеров-проектировщиков.

Под обучением далее понимается двусторонний процесс передачи знаний о сценариях решения задач автоматизированного проектирования между пользователем и экспертом САПР.

Единицей сценария является событие воздействия проектировщика на элемент интерфейса приложения САПР. Это событие необходимо зарегистрировать и представить в формате, допускающем последующее воспроизведение. Регистрация осуществляется путем перехвата сообщения ОС оконной функции приложения САПР. Функции перехвата, распознавания и регистрации событий выполняет приложение «Регистратор» [5]. Таким образом, последовательность действий пользователя представляет собой сценарий выполнения проектной операции, который может содержать ошибки, требующие комментариев эксперта.

Для получения консультации проектировщик размещает заявку на портале методической поддержки AddInCAD. Портал – это интернет-приложение, предназначенное для обеспечения удаленной коммуникации пользователя САПР и эксперта. Эксперт, получивший заявку в формате файла сценария, воспроизводит его на целевой САПР в пошаговом режиме с помощью настольного приложения AddInCAD, делает необходимые правки и комментарии, а если ошибка является типовой, замещает присланный сценарий на эталонный (рис.1).

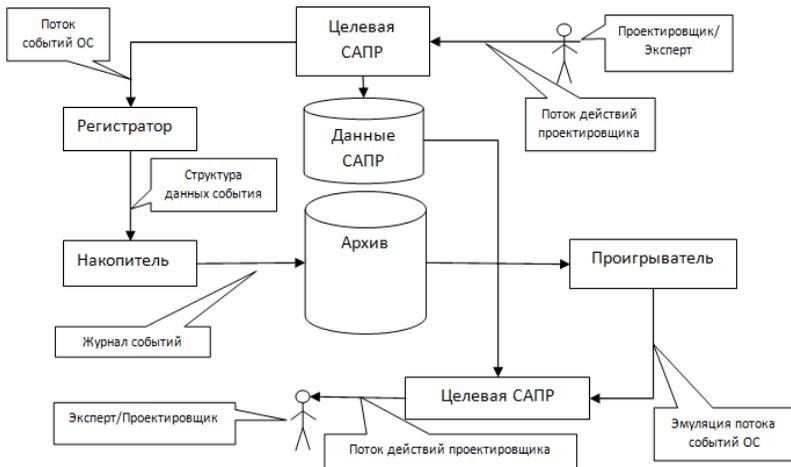


Рис. 1. Схема взаимодействия проектировщика и эксперта в режиме обучения через деятельность

Реализация описанной схемы взаимодействия требует решения ряда научных и инженерных задач, связанных с разработкой модели представления знаний о событии, метода фильтрации нецеленаправленных действий пользователя, методов идентификации динамических элементов интерфейса, регистрации контекста выполняемой операции.

**Модель события** представляет собой фреймовую структуру  $F(P,M)$ , где  $P$  – множество декларативных слотов и  $M$  – множество процедурных слотов. Набор слотов конкретного фрейма определяется его местом в родовидовой иерархии (иерархии наследования).

**Метод фильтрации нецеленаправленных действий** пользователя базируется на понятии транзакции. Определение транзакции включает в себя множество  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n\}$  точек начала транзакции, где  $b_i$  – событие взаимодействия, открывающее транзакцию, и определенные на этом множестве производственные правила вида: ЕСЛИ  $b_i \in B$  ТО  $E_i = \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{ij}, \dots, e_{ik}\}$  – множество точек завершения транзакции, И  $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{ik}\}$  – множество точек отката транзакции.

**Модель контекста** включает определение множества перманентных данных  $D$ , составляющих контекст приложения, функционального соответствия  $G_1 \subseteq D \times C$  между  $D$  и  $C$  – множеством каталогов размещения файлов САПР и функционального соответствия  $G_2 \subseteq I \times D$  между множеством  $I$  элементов интерфейса САПР и множеством контекста  $D$ .

**Идентификация динамических элементов интерфейса**, на который направлено действие пользователя, составляет отдельную проблему. Регистратор не имеет априорной информации о древовидной структуре интерфейса целевой САПР и восстанавливает ее динамически, добавляя новые элементы по мере того, как пользователь использует их в ходе сценария регистрации. Процедура добавления нового элемента включает присвоение ему уникального инкрементного кода и идентификацию цепочки родительских элементов для встраивания в древовидную структуру интерфейса.

В докладе представлены результаты решения этих задач, а также примеры практического использования технологии обучения через деятельность на примерах методического сопровождения продуктов отечественной компании CSoft (рис. 1).

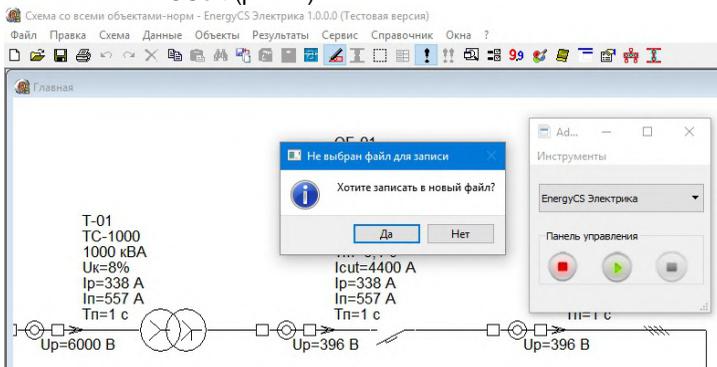


Рис. 1. Начало сеанса регистрации

### Литература

1. **Carlson L. E.**, Sullivan J. F. Hands-on engineering: learning by doing in the integrated teaching and learning program //International Journal of Engineering Education. – 1999. – Т. 15. – №. 1. – С. 20-31.
2. **de Vries E.** Students' construction of external representations in design-based learning situations //Learning and instruction. – 2006. – Т. 16. – №. 3. – С. 213-227. doi:10.1016/j.learninstruc.2006.03.006
3. **Черепашков А. А.** Обучение автоматизированному проектированию в авторизованном учебном центре технического вуза //САПР и графика. – 2009. – №. 12. – С. 88-91.
4. **Черепашков А. А.** Методика оценки эффективности подготовки целевого персонала машиностроительных САПР //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – №. 4-3.
5. **Пантелеев Е.Р.**, Зуйков В.А., Катанаев А.Ю. Программный комплекс регистрации и экспертизы действий пользователя САПР «AddInCAD». Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015662971. – М.: РОСПАТЕНТ, 25.02.2016.

УДК 004.6

О.М. ГУРФОВА, аспирант,  
И.Д. РАТМАНОВА, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: omgur@mail.ru, idr@ispu.ru

## Разработка аналитического сервиса оценки эффективности энергопотребления в бюджетной сфере области

**Аннотация.** Разработана методика оценки эффективности энергопотребления бюджетными потребителями, основанная на бенчмаркинговом подходе, методах кластеризации и нечетких описаниях. Данная методика программно реализована посредством встроенной бизнес-логики СУБД в реляционной базе данных с использованием технологии OLAP.

**Ключевые слова:** бенчмаркинг энергопотребления, методы оценки, кластеризация, нечеткие множества, OLAP.

О.М. GURFOVA, postgraduate student,  
I.D. RATMANOVA, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: omgur@mail.ru, idr@ispu.ru

## Analytic service for power consumption efficiency assessment within the public sector of regional economy

**Abstract.** The article describes the developed method of power-consumption efficiency evaluation within the public sector of economy. The method is based on benchmarking, clustering and fuzzy sets. The developed methodology is implemented by means of DBMS integrated business logic on a relational database using OLAP.

**Key words:** power consumption benchmarking analysis, assessment methods, clustering, fuzzy sets, OLAP.

Оценка эффективности потребления топливно-энергетических ресурсов представляет собой один из наиболее существенных этапов при планировании мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности.

Авторами предложен бенчмаркинг подход к оценке эффективности энергопотребления, основанный на нечетких множествах.

Процесс бенчмаркинга энергопотребления включает следующие основные этапы:

1. Организация регионального мониторинга энергопотребления в бюджетной сфере с определением средних нормативов показателей энергетической эффективности для соответствующих кластеров потребителей.

2. Оценка уровня энергопотребления бюджетных организаций, а также соответствующих организационных структур, включая муниципальные районы, городские округа, департаменты, министерства и т.п.

3. Ретроспективный сравнительный анализ показателей энергоэффективности организаций в целях выявления лидеров и аутсайдеров с подготовкой ежегодных аналитических отчетов. Определение проблемных зон для принятия обоснованных программных решений в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [1].

В рамках данного подхода в первую очередь все множество бюджетных потребителей топливно-энергетических ресурсов разбивается на однородные по специфике потребления группы – кластеры. Далее определяется средняя величина энергопотребления для каждого кластера, причем аномальные показатели исключаются из рассмотрения. На следующем этапе разработанной методики вычисляется оценка потребления каждого из нормируемых ресурсов каждой организацией посредством сравнения удельного показателя энергопотребления организации с нормативом по кластеру, в который входит данный потребитель. На последующих этапах происходит отнесение организаций к одному из предопределенных нечетких множеств по уровню удельного энергопотребления и интеграция полученных значений до уровня муниципального района, городского округа, департамента, региона в целом и т.д.

Определение средних нормативов показателей, лежащих в основе оценок любого уровня обобщения, осуществляется в соответствии со следующей формулой:

$$U_i = \frac{X_{ин}}{X_i}, \quad (1)$$

где  $X_{iH}$  – средний норматив потребления  $i$ -го ресурса для соответствующего кластера ( $i=1,2, \dots, n$ , где  $n$  – количество измеренных показателей, соответствующих потребленным ресурсам);

$X_i$  – значение измеренного  $i$ -го показателя.

Таким образом, определяется отклонение целевого (удельного) показателя энергоэффективности от нормированного значения, принятого для кластера. Функция полезности имеет тип «чем меньше значение целевого показателя, тем лучше (выше оценка)», так как целью применения методики является минимизация потребления ресурсов. На данном этапе возможно ранжирование организаций-потребителей по полученному показателю с целью определения так называемых «проблемных зон», где необходимо проведение мероприятий, направленных на оптимизацию потребления нерационально используемого ресурса.

Как правило, количественной оценки недостаточно для оценки уровня энергопотребления организации. Для лица, принимающего решения, важно знать, насколько и в какой степени «хороши» или «плохи» полученные оценки. Возникает потребность в лингвистической оценке уровня потребления топливно-энергетических ресурсов и воды. Таким образом, представляется целесообразным введение в методику системы нечетких множеств, описывающих состояния системы показателей. В ходе экспертной оценки выделено пять подмножеств с соответствующим значением уровня энергопотребления. Функция, трансформирующая количественную оценку  $i$ -го ресурса в лингвистическое значение  $L_i$  из подмножества на множестве уровней энергопотребления  $E_i$ , описана табл. 1.

Таблица 1. Подмножества состояний уровня потребления ТЭР и воды организационной структурой

<i>Интервал значения <math>E_i</math></i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование подмножества <math>L_i</math></i>
$\varepsilon \in [0;0,4)$	$E_{1i}$	<i>Завышенный уровень потребления ресурса</i>
$\varepsilon \in [0,4;0,8)$	$E_{2i}$	<i>Повышенный уровень потребления ресурса</i>
$\varepsilon \in [0,8;1,2)$	$E_{3i}$	<i>Средний уровень потребления ресурса</i>
$\varepsilon \in [1,2; \infty)$	$E_{4i}$	<i>Пониженный уровень потребления ресурса</i>

После того, как проведена соответствующая классификация уровня потребления всех потребителей, входящих в состав соответствующей организационной структуры, можно перейти к этапу вычисления оценки уровня энергопотребления  $i$ -го ресурса организационной структуры в целом. Эта оценка вычисляется по следующей формуле:

$$\varepsilon_i = \sum_{n=1}^4 \varepsilon_{in} \sum_{j=1}^m \frac{\alpha_{inj}}{m}, \quad (2)$$

где  $m$  – количество организаций в исследуемой организационной структуре;  $\varepsilon_{in} = 0,25n$ .

Полученная оценка также может быть подвергнута переводу в лингвистическое выражение и т.д. Располагая оценками всех нормируемых ресурсов в организационной структуре, мы можем вычислить интегральную оценку уровня потребления данной организационной структуры. Для четырех основных нормируемых ресурсов (электрическая энергия, тепловая энергия, холодная и горячая вода) расчет производится по формуле:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^4 w_i \varepsilon_i, \quad (3)$$

Данная методика была интегрирована в хранилище данных информационно-аналитической системы ведения топливно-энергетических балансов региона посредством встроенной бизнес-логики. Архитектура созданной системы представлена на рис. 1.

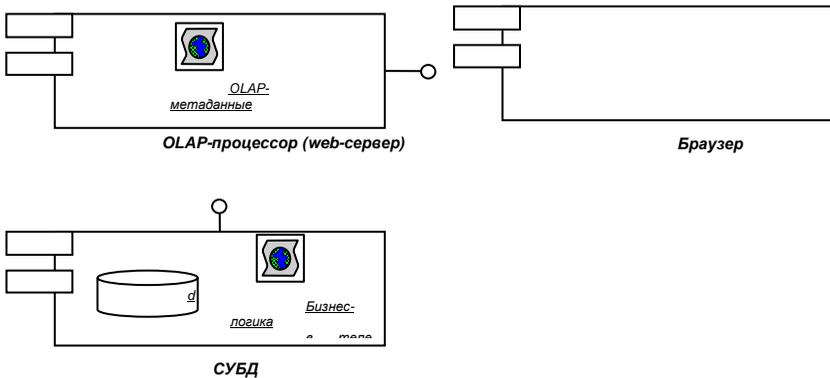


Рис. 1. Диаграмма компонентов системы

Апробация созданного сервиса выполнена на основе данных мониторинга производства и потребления топливно-энергетических ресурсов во Владимирской области. При организации базы данных была применена технология OLAP, позволяющая выполнять многомерный анализ уровня энергопотребления в следующем базисе измерений: Показатель (оценка энергопотребления) – Ресурс – Период – Потребитель (с уровнями обобщения Организация – Муниципальное образование) – Сфера потребления (с уровнями обобщения Кластер потребителей – Орган государствен-

ного управления). В основу сервиса положена определенная совокупность базовых классов, представленных на рис. 2.

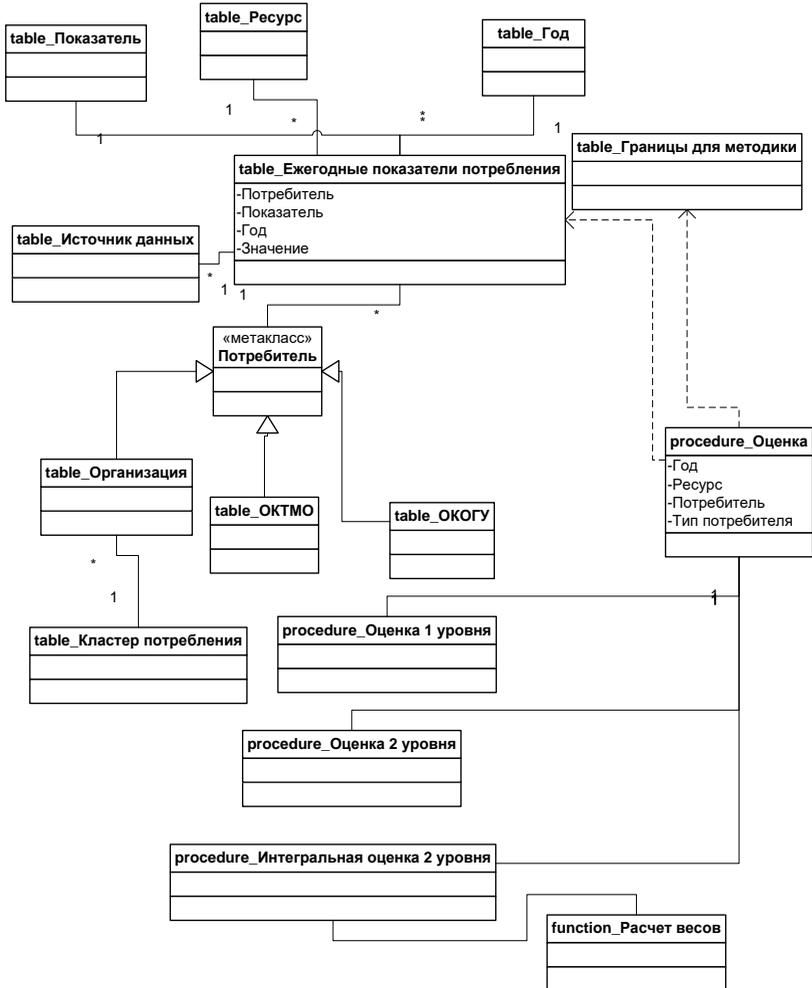


Рис. 2. Диаграмма классов системы оценки

Множество лингвистических оценок методики и соответствующие им границы хранятся в одной из таблиц базы данных и при желании могут быть изменены на основе экспертных выводов. Следует отметить, в базе

данных накапливается ретроспектива средних норматив потребления по кластерам для всех ресурсов и используется в процессе оценки уровня потребления за соответствующий год.

Представленная в данной работе методика оценки позволяет выявить проблемные зоны энергопотребления в государственном и муниципальном секторах области и оптимальным образом определить направления программных мероприятий, а также, опираясь на накопленную ретроспективу оценок, сделать выводы об эффективности принимаемых решений. Сочетание данного подхода с OLAP-технологией делает методику доступной и удобной в применении. В целом подход рассчитан на решение задачи рационального потребления топливно-энергетических ресурсов и основан на современных научно-технических решениях.

### Литература

1. **Ратманова И.Д.**, Гурфова О.М. Подход к организации бенчмаркинга энергопотребления в бюджетной сфере региона. // Вестник ИГЭУ. – 2016. – №4. – С.30-38

УДК 004.31

Д.Д. КАЙЗЕР, М.Д. КАЙЗЕР, студенты,  
О.В. ФОМИНА, программист,  
А.М. САДЫКОВ, к.т.н., доцент,  
С.В. КОСЯКОВ<sup>2</sup>, д.т.н., профессор,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: ksv@ispu.ru

### Архитектурные решения для веб-ГИС предприятия энергетических сетей крупного города

**Аннотация.** В работе рассмотрены проблемы программной реализации ГИС, обеспечивающей работу множества пользователей с большими объемами данных в сети Интернет, а также пути решения этих проблем, выявленные и опробованные при создании корпоративной веб-ГИС предприятия тепловых сетей города Санкт-Петербурга.

**Ключевые слова:** геоинформационная система, корпоративная информационная система, предприятие тепловых сетей.

D.D. KAIZER, M.D. KAIZER, students,  
O.V. FOMINA, engineer, A.M. SADYKOV, candidate of engineering,  
S.V. KOSYAKOV, doctor of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: ksv@ispu.ru

## Web-based GIS Architecture for urban power grid

**Abstract.** The paper is dedicated to the issues of multi-user GIS software development for big data operating within internet and the solutions found and being used for St. Petersburg's power grid corporate information system.

**Keywords:** geographical information system, corporate information system, urban power grid.

Современные методы и платформы реализации ГИС предоставляют разработчикам хорошие возможности для быстрой и качественной реализации информационных систем. Одной из лидирующих в мире платформ для разработки ГИС является ArcGIS (<https://www.esri-cis.ru>) фирмы ESRI (США). Среда разработки этой системы включает большое количество готовых компонентов, решений и примеров реализации для различных областей применения и технических средств [1]. Однако при создании ГИС в составе корпоративных информационных систем крупных организаций возникает множество проблем. Проблемы обусловлены противоречивостью требований, возникающих вследствие масштаба и распределенной природы системы, необходимости интеграции различных баз данных и унаследованных подсистем, разнообразия пользовательских задач и других факторов. Это порождает необходимость поиска и исследования специфических архитектурных решений при проектировании программного обеспечения ГИС и системы в целом.

При разработке веб-ГИС в составе информационно-графической системы (ИГС) Государственного унитарного предприятия «Топливо-энергетический комплекс Санкт-Петербурга» (ГУП «ТЭК СПб») [2] авторами решались следующие архитектурные задачи:

1. Реализация на базе ГИС общего интерфейса ИГС, позволяющего предоставлять различным категориям пользователей регламентированный доступ как картографическим, данным, так и к данным других подсистем, реализованных на различных программных платформах, в частности на 1С-Предприятие (<http://1c.ru>) и ZuluGIS (<https://www.politerm.com/>).

2. Организация целостности моделей данных, включающих пространственные данные, доступ к которым обеспечивается средствами ArcGIS, и распределённые атрибутивные данные, обрабатываемые программным обеспечением других подсистем.

3. Организация различных представлений данных при решении различных задач (редактирование карт, поиск и визуализация на карте раз-

личных данных, расчеты режимов работы сетей, отслеживание на карте положения и маршрутов автомобилей аварийных служб, формирование аналитических отчетов и т.д.) на различных технических средствах (персональные компьютеры, планшеты, мобильные телефоны).

4. Обеспечение приемлемой скорости обработки больших объемов данных в рамках клиент-серверной архитектуры, реализованной на базе веб-технологий с использованием веб-браузеров для организации клиентских приложений.

В результате проведения серии экспериментов, в рамках которых исследовалось влияние распределения различных функций обработки данных между клиентом и сервером, а также различных вариантов организации хранения и передачи данных между клиентом и сервером на характеристики пользовательских приложений, определена структура ГИС и ее связи с другими подсистемами (рис. 1). Эта структура обеспечивает необходимые компромиссы в удовлетворении противоречивых требований по скорости работы, гибкости системы, надежности, минимизации дублирования функций, сложности разработки.

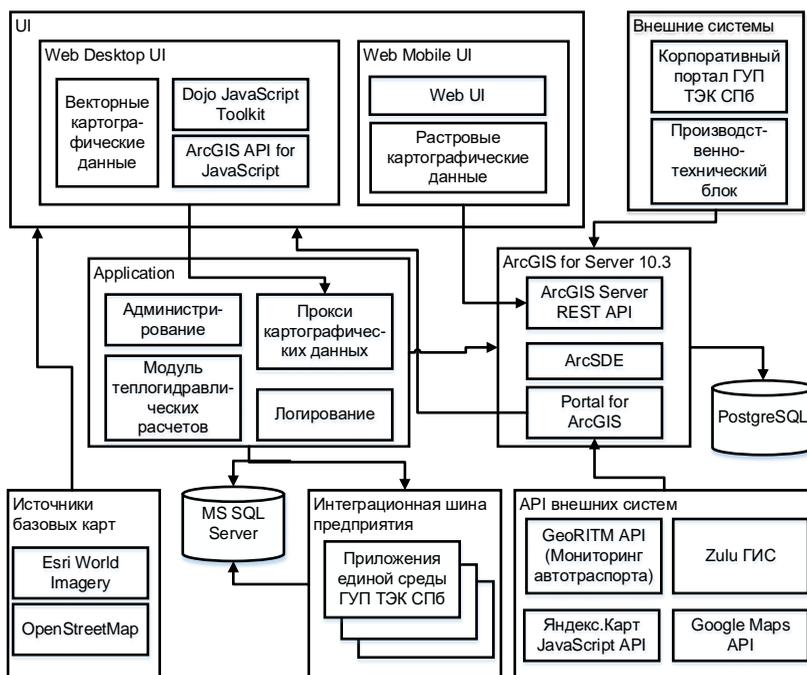


Рис. 1. Структура веб-ГИС предприятия

Особенностями сформированного решения являются:

1. Наличие специализированного кэша запросов пользователей к ГИС. Это позволяет существенно увеличить скорость реакции пользовательских приложений в процессе работы, разгружает основной сервер ArcGIS от большого количества обращений.

2. Оптимизированное распределение между растровыми и векторным способами представления графических данных при их передаче в клиентские приложения.

3. Формирование специальных промежуточных моделей данных на клиентской стороне при реализации функций редактирования, топологического контроля и др.

4. Использование пространственных структур данных и информационных моделей элементов тепловых сетей, поддерживаемых в системах расчета режимов, в частности в ZuluGIS, которая используется для расчетов в ГУП «ТЭК СПб». Это позволяет упростить конвертирование данных между подсистемами и устранить дублирование функций топологического анализа сети.

Рассмотренные решения находятся в стадии промышленного внедрения в составе ИГС в ГУП «ТЭК СПб». При этом разработанные элементы программной архитектуры и программные компоненты могут быть использованы при разработке других информационных систем для предприятий энергетических сетей.

#### Литература

1. **Пиньеде Фу**, Цзюлинь Сунь. Веб-ГИС. Принципы и применение. Пер. с англ. - М.: - Издательство Дата+, 2013, - 356 с.
2. **Информационно-графическая** система внедрена в Кронштадте. 10.03.2016. Официальный сайт ГУП "ТЭК СПб". [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.gptek.spb.ru/press/news/informacionno-graficheskaja-sistema-vnedrena-v-kronshtadte/>.

УДК 519.2

Б.Ф. СКОВОРОДА, к.ф.-м.н., доцент  
И.А. ТИХОМИРОВА, ассистент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [sbf2011@yandex.ru](mailto:sbf2011@yandex.ru)<sup>1</sup>, [tihomirova47@yandex.ru](mailto:tihomirova47@yandex.ru)<sup>2</sup>

### **Доверительная область для параметров двухпараметрического показательного распределения**

**Аннотация.** Построена доверительная область в виде прямоугольника для параметров двухпараметрического показательного распределения.

**Ключевые слова:** доверительная область, двухпараметрическое показательное распределение.

B.F. SKOVORODA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent,  
I.A. TIKHOMIROVA, assistant

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: sbf2011@yandex.ru<sup>1</sup>, tikhomirova47@yandex.ru<sup>2</sup>

## The confidence region for parameters of a two-parameter exponential distribution

**Abstract.** The confidence region in the form of a rectangle for parameters two-parameter exponential distribution is constructed.

**Key words:** confidence region, two-parameter exponential distribution.

1. **Введение.** Пусть  $X_1, \dots, X_n$  – случайная выборка из генеральной совокупности признака  $X$ , имеющего двухпараметрическое показательное распределение с плотностью распределения  $f(x) = \lambda e^{-\lambda(x-a)}$  при  $x \geq a$  и  $f(x) = 0$  при  $x < a$ , где  $a$  – параметр сдвига ( $a \in \mathbf{R}$ ), а  $\lambda$  – параметр масштаба ( $\lambda > 0$ ). Двухпараметрическое показательное распределение используется в теории надёжности систем, при этом признак  $X$  рассматривается как продолжительность жизни некоторой системы, а параметр сдвига, который в этом случае предполагается неотрицательным, как минимальная продолжительность жизни этой системы.

В [1], используя достаточные статистики  $X_{(1)} = \min(X_1, \dots, X_n)$  и  $\bar{X} = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n}$ , получены точные доверительные интервалы минималь-

ной длины для параметра сдвига и для параметра масштаба двухпараметрического показательного распределения. В данной работе построена доверительная область в виде прямоугольника для параметров этого распределения.

2. **Построение доверительной области.** Если упорядочить элементы случайной выборки  $X_1, \dots, X_n$ , то получим случайные величины  $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$ , удовлетворяющие неравенству  $X_{(1)} \leq \dots \leq X_{(n)}$ , эти случайные величины называют порядковыми статистиками. В [2] (§ 2.2) показано, что плотность совместного распределения порядковых статистик  $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$  равна  $n! f(x_1) \cdot \dots \cdot f(x_n)$  при  $x_1 \leq \dots \leq x_n$ . В случае, когда случайная выборка получена из двухпараметрического показательного распределения, плотность совместного распределения порядковых статистик будет равна  $n! \lambda^n e^{-\lambda(x_1 + \dots + x_n - an)}$  при  $a \leq x_1 \leq \dots \leq x_n$ . Рассмотрим преобразование следующего вида:

$$Y_1 = nX_{(1)}, Y_i = (n-i+1)X_{(i)} + X_{(i-1)} + \dots + X_{(1)}, i = 2, \dots, n.$$

Плотность совместного распределения случайных величин  $Y_1, \dots, Y_n$  будет такой:  $f_{Y_1, \dots, Y_n}(y_1, \dots, y_n) = \lambda^n e^{-\lambda(y_n - an)}$  при  $an \leq y_1 \leq \dots \leq y_n$ .

Интегрируя плотность распределения  $f_{Y_1, \dots, Y_n}(y_1, \dots, y_n)$  по переменным  $y_2, \dots, y_{n-1}$ , получим плотность совместного распределения случайных величин  $Y_1$  и  $Y_n$ , а именно:

$$f_{Y_1, Y_n}(y_1, y_n) = \frac{\lambda^n}{(n-2)!} (y_n - y_1)^{n-2} e^{-\lambda(y_n - an)} \quad \text{при } an \leq y_1 \leq y_n. \quad \text{Отметим,}$$

что  $Y_n = X_{(1)} + \dots + X_{(n)} = X_1 + \dots + X_n = n\bar{X}$ .

Для построения доверительной области для параметров двухпараметрического показательного распределения используем две статистики:  $T_1 = \frac{X_{(1)} - a}{\bar{X} - X_{(1)}}$  и  $T_2 = \lambda n (\bar{X} - X_{(1)})$ . Эти статистики являются функциями от

случайных величин  $Y_1$  и  $Y_n$ :  $T_1 = \frac{Y_1 - an}{Y_n - Y_1}$ ,  $T_2 = \lambda(Y_n - Y_1)$ . Нетрудно проверить, что плотность совместного распределения случайных величин  $T_1$  и  $T_2$  имеет следующий вид:  $f_{T_1, T_2}(t_1, t_2) = \frac{1}{(n-2)!} t_2^{n-1} e^{-(t_1+1)t_2}$  при  $t_1 \geq 0, t_2 \geq 0$ .

Если для заданной вероятности  $\gamma$  найти действительные числа  $x_1, x_2, y_1, y_2$  такие, что  $P(x_1 < T_1 < x_2, y_1 < T_2 < y_2) = \gamma$ , то множество точек

$$\left\{ (a, \lambda) \mid X_{(1)} - x_2 (\bar{X} - X_{(1)}) < a < X_{(1)} - x_1 (\bar{X} - X_{(1)}), \frac{y_1}{n(\bar{X} - X_{(1)})} < \lambda < \frac{y_2}{n(\bar{X} - X_{(1)})} \right\} \quad \text{будет}$$

доверительной областью с надёжностью  $\gamma$  для параметров  $a$  и  $\lambda$ .

### Литература

1. **Золотухина Л.А.** Доверительные интервалы наименьшей длины для параметров показательного двухпараметрического распределения. Заводская лаборатория, Диагностика материалов. № 11 (2000), с.54-57.
2. **Дэйвис Т.** Порядковые статистики. М.: Наука, 1979.

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

### Обобщение законов алгебры трёх множеств

**Аннотация.** Для булевой алгебры множеств ( $\cap$ ;  $\cup$ ) обобщены примеры над тремя множествами по пяти подгруппам, что упрощает восприятие этих операций.

**Ключевые слова:** булева алгебра, операции над множествами, обобщение примеров.

S.V. ANISIMOV, Ph.D., associate professor

Ivanovo State Power University them. Lenin  
153003, Ivanovo, ul. Rabfakovskaya, d. 34

### The generalization of the laws of the algebra of three sets

**Abstract.** For Boolean algebras of sets ( $\cap$ ;  $\cup$ ) summarized examples of the three sets of five subgroups, which simplifies the perception of these operations.

**Key:** Boolean algebra, operations on sets, generalization of examples.

Рассмотрим булеву алгебру множеств в виде операций объединения (обозначение  $\cup$ ) и пересечения (обозначение  $\cap$ ) множеств [1].

Первая операция ( $\cup$ ) определяет множество, состоящее из всех тех и только тех элементов, которые принадлежат хотя бы одному из исходных множеств. Это записывается для множеств А и В так:

$$A \cup B = \{x \mid x \in A \text{ или } x \in B\}$$

Вторая операция ( $\cap$ ) определяет множество, состоящее из всех тех и только тех элементов, которые принадлежат одновременно исходным множествам. Это записывается для множеств А и В так:

$$A \cap B = \{x \mid x \in A \text{ и } x \in B\}$$

Для трёх множеств их объединение и пересечение записывается явно, например [2]:

- 1)  $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ ;
- 2)  $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ ;
- 3)  $A \cup (A \cap B) = A$ ;
- 4)  $A \cap (A \cup B) = A$ .

Предлагается обобщить операции исходного множества А над двумя другими множествами для упрощения восприятия этих операций и их расширения. Указанное обобщение можно выполнить по пяти подгруппам:

- 1) с множествами  $B$  и  $C$ ,
- 2) с исходными множествами  $A$  и  $B$ ,
- 3) с полным множеством  $U$ ,
- 4) с пустым множеством  $\emptyset$ ,
- 5) с противоположным множеством  $\bar{A}$ .

I. Операции объединения с пересечением будут выглядеть для пяти подгрупп так:

- 1)  $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ ;
- 2)  $A \cup (A \cap B) = A$  (закон поглощения);
- 3)  $A \cup (U \cap B) = A \cup B$ ;
- 4)  $A \cup (\emptyset \cap B) = A$ ;
- 5)  $A \cup (\bar{A} \cap B) = A \cup B$ .

II. Операции пересечения с объединением будут выглядеть для пяти подгрупп так:

- 1)  $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ ;
- 2)  $A \cap (A \cup B) = A$  (закон поглощения);
- 3)  $A \cap (U \cup B) = A$ ;
- 4)  $A \cap (\emptyset \cup B) = A \cap B$ ;
- 5)  $A \cap (\bar{A} \cup B) = A \cap B$ .

#### Литература

1. Кузнецов, О.П. Дискретная математика для инженеров. М.: Изд-во Лань, 2007.
2. Томина, И.В. Методические указания и контрольная работа по курсу «Математика» (4 семестр). Иваново, ИГЭУ, 2015.

УДК 621.311

Е.П. МИЛОСЕРДОВ к.т.н. доцент,  
М.А. КУЗНЕЦОВ студент, А. А. МУКУЧЯН студент

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская , 34  
*E-mail: mepal@mail.ru*

## **Алгоритмы поддержки принятия решений по выбору режимов в системах электроснабжения**

**Аннотация.** Рассмотрены алгоритмы выбора оперативно-диспетчерским персоналом электроэнергетических систем режимов электроснабжения.

**Ключевые слова:** Режимы электроснабжения, поддержка принятия решений.

Е.П. MILOSERDOV, ph.d. assoc.,  
M.A. KUZNETSOV, A.A. MUKUCHYAN, students

Ivanovo State Power Engineering University. IN AND. Lenin  
153003, Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34  
*E-mail mepal@mail.ru*

## **Algorithms for decision support for the selection of modes in power supply systems**

**Abstract.** The algorithms of the choice by the operational-dispatching personnel of electric power systems of power supply modes are considered.

**Keywords:** Modes of electricity supply, decision support.

В соответствии с действующими в настоящее время правилами [1]: технологические режимы работы или эксплуатационное состояние управляемых объектов или установок изменяются только по команде диспетчера соответствующего диспетчерского центра. Таким образом, управление режимом энергосистемы может осуществляться субъектом оперативно-диспетчерского управления или несколькими субъектами оперативно-диспетчерского управления, находящимися в соподчинении, то есть являющимися вышестоящими и нижестоящими по отношению друг к другу. На каждом из таких уровней оперативный персонал имеет разные полномочия и технические возможности по управлению электроэнергетическими режимами энергосистемы.

До начала 90-х годов в рамках Единой энергосистемы России существовали жесткие регламенты оперативно-диспетчерского управления, в рамках которых выбор режимов электроснабжения предусматривался на верхних уровнях управления энергосистемой, а на нижние уровни возлагались функции поддержки этих режимов. Такой подход, безусловно, способствовал повышению надежности электроснабжения, но был далеко не всегда экономически целесообразен как для энергосистемы в це-

лом, и особенно для входящих в нее энергетических предприятий. В связи с реформой электроэнергетики, выделении отдельных самостоятельных энергетических предприятий, осуществляющих генерацию, передачу и распределение электрической энергии, концепции управления электроэнергетическими режимами были пересмотрены. На всех уровнях управления энергосистемой приоритетными показателями при выборе режимов стали экономические показатели, а требования по надежности стали рассматриваться как обязательные ограничения. Поскольку экономические показатели при выборе режимов не поддерживаются автоматической управления энергосистем, оперативный персонал на разных уровнях должен самостоятельно принимать решения по выбору наиболее рациональных режимов. С этой точки зрения целесообразно разрабатывать и применять, размещаемые вне контура управления, автоматизированные системы поддержки принятия решений. [2]

На каждом уровне управления такие системы будут содержать различные компоненты. Предполагается, что при выборе режима оперативный персонал может выбирать источники мощности, регулировать уровень напряжений в узлах нагрузки (естественно оставаясь в пределах, ограниченных стандартами) изменять генерируемую и потребляемую реактивную мощность с учетом технических возможностей средств регулирования, изменять схемы электроснабжения для уменьшения потерь энергии.

Рассмотрим математические модели, позволяющие осуществлять выбор источников полной мощности в системах электроснабжения и учитывать реактивную мощность. В первую очередь оперативный персонал имеет возможность подключать или отключать источники электроснабжения. В качестве источников электроснабжения к узлам нагрузки могут подключаться через трансформаторы воздушные линии различного напряжения, кабельные линии, подключенные к шинам генераторного напряжения близкорасположенных ЭС, а также подстанции, подключенные к магистральным и распределительным сетям. Для того чтобы каждой комбинации мощностей нагрузок подобрать наиболее рациональную комбинацию источников электроснабжения предлагается общеизвестная модификация «модели рюкзака». Поскольку каждый источник электроснабжения, подключенный к узлу нагрузки, имеет различную удельную стоимость электроэнергии, совокупную мощность потребления следует набирать как комбинацию источников с минимальными удельными стоимостями электроэнергии. При этом суммарная мощность источников должна быть не меньше мощности нагрузки. Существует несколько алгоритмов набора источников по таким условиям, при небольшом числе источников вполне приемлемым является алгоритм полного перебора.

Для соблюдения баланса генерируемой и потребляемой реактивной мощности необходимы средства управления генерируемой реактивной мощностью, распределенные в узлах нагрузки. К таким средствам, до-

ступным оперативному персоналу, управляющему режимами в узлах нагрузки, относятся:

Синхронные двигатели – они могут генерировать реактивную мощность при повышении тока возбуждения выше номинального.

Синхронные компенсаторы – специальные синхронные двигатели без механической нагрузки.

Статические компенсирующие устройства (например, батареи конденсаторов)

Трансформаторы с устройством регулирования напряжения под нагрузкой [3].

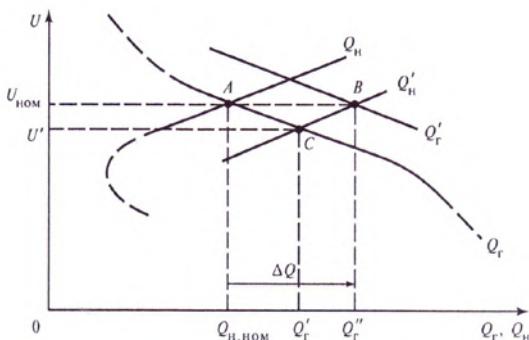


Рис. 1. Статические характеристики генерируемой  $Q_g$  и потребляемой  $Q_n$  реактивных мощностей в узле электрической сети

Условию баланса реактивной мощности в узле электрической сети соответствует точка А пересечения характеристик  $Q_g$  и  $Q_n$  (рис. 1) [3]. Предположим, что при этом напряжение имеет номинальное значение  $U_{ном}$ . При увеличении реактивной нагрузки баланс нарушается и может быть восстановлен в точке С при меньших значениях  $U'$ ,  $Q_n'$ , и  $Q_g'$ . Восстановить номинальное напряжение возможно, если генерируемую реактивную мощность увеличить на значение  $dQ_g$  – баланс в точке В.

Для каждого пункта управления системами электроснабжения при создании систем поддержки принятия решений необходимо предварительно просчитать возможные режимы и отобрать в порядке предпочтительности по экономическим критериям с учетом технических ограничений.

#### Литература

1. **Правила** оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике. (В редакции постановлений Правительства Российской Федерации от 06.05.2006 г. N 273; от 31.08.2006 г. N 530; от 16.02.2008 г. N 86; от 03.03.2010 г. N 117)
2. **Управление** режимами энергосистемы в рыночных условиях. Опыт ОАО «СО-ЦДУ ЕЭС» Б. И. Аюев, Москва 19 сентября 2007
3. **Коротков В.Ф.** Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах: [Издательский дом МЭИ](#), 2013 г.

УДК 621.787.

М.Ю. ВОЛКОВА, к.т.н, доцент  
Е.В. ЕГОРЫЧЕВА, к.т.н, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34  
*E-mail: kig@kig.ispu.ru*

## **Использование электронных средств в исследовании проблем износа поверхности металла**

**Аннотация.** При проведении экспериментов по проблемам износа поверхности металла оценивается степень комплексного использования электронных средств для контроля и визуализации результатов исследований. Рассматриваются вопросы шероховатости поверхности как размерной характеристики микронеровностей и микрорельефа.

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, электронные средства, износ поверхности металла, технические требования.

M. VOLKOVA, cand.tech.sci., associate professor  
E.V. EGORYCHEVA, cand.tech.sci., associate professor

Ivanovo State Power University them.Lenin  
153003, Ivanovo, ul. Rabfakovskaya, d. 34  
*E-mail: kig@kig.ispu.ru*

## **Electronic tools using in the study of problems of metal surface wear**

**Annotation.** During the experiments on the problems of metal surface wear, the degree of complex of electronic means using for monitoring and visualizing the results of studies is estimated. The problems of surface roughness as a dimensional characteristic of microroughness and microrelief are considered.

**Key words:** surface roughness, electronic tools, metal surface wear, technical requirements.

При контроле состояния поверхности металла основным критерием служит шероховатость. Измерения шероховатости поверхности осуществлялись на профилометре-профилографе модели АБРИС-ПМ7, запись профилограмм производилась с помощью ЭВМ.

Шероховатость поверхности рассматривалась как размерная характеристика микронеровностей, определяемая одним из следующих параметров: средним арифметическим отклонением профиля Ra (средним арифметическим абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины), высотой неровностей Rz по десяти точкам (средним расстоянием между пятью высшими и пятью низшими точками измеряемого профиля в пределах базовой длины).

Шероховатость поверхности определялась по базовой длине, то есть на специально выбранной длине участка поверхности. В зависимости от высоты неровностей (класса шероховатости) применялась шкала Ra (6-12 классы) или шкала Rz (1-5 и 13-14 классы). Визуальный контроль шероховатости поверхностей осуществлялся с помощью микроскопа модели МИС-11 с помощью цифровой камеры Canon PowerShot A610 5.0 MEGA PIXELS. Растровые изображения профилограмм обрабатывались с помощью программы «Photoshop 8.0» с целью перевода в программу «GetData» и дальнейшей визуализации исследуемой поверхности. Для изучения и анализа изменения текстуры поверхности использована методика трехмерного компьютерного моделирования.

Моделирование текстуры поверхности позволяет перейти от линейно-выборочного анализа микрорельефа к трехмерному топографическому представлению, исследовать тенденцию поведения микрорельефа

Для построения модели использовалась программная среда трехмерного моделирования 3D Studio MAX.

На первом этапе алгоритма построения трехмерной модели собирается параметрическая информация модели. Для этого с исследуемой поверхности снимаются (сканируются) профилограммы (этап 1). Далее, для возможности обработки при помощи вычислительной техники производится оцифровка профилограмм (этап 2).

Полученные файлы оцифровки передаются в среду трехмерного моделирования 3D Studio MAX. посредством программного плагина XY – spline. Третьим этапом является создание базовой модели поверхности, состоящей из набора сплайнов. Шаг дискретизации  $h$  устанавливался равным шагу сканирования профилограмм. Длина сплайнов  $l$  определялась длиной профилограммы.

Базовая модель параметризуется согласно полученным профилограммам и приобретает при визуализации форму поверхности адекватную реальной (этап 4).

Степень адекватности определяется степенью синхронизации сканирования, точностью оцифровки профилограмм, дискретностью базовой модели. Согласно предложенному алгоритму сначала были получены профилограммы поверхности с помощью профилометра-профилографа модели АБРИС-ПМ7.

С каждого образца снималось шесть профилограмм с шагом сканирования  $h=0,1$  мм; длина профилограммы  $l=0,8$  мм, таким образом, профилограммы снимались с площадки длиной  $l=0,8$  и шириной  $b=0,5$ мм.

Особенности программного обеспечения профилографа позволяют получение растрового изображения профилограмм на экране компьютера (рис. 1.).

Для получения возможности дальнейшего компьютерного моделирования изображение профилограмм оцифровывалось с помощью программы GetData-программы для оцифровки графиков диаграмм и карт.

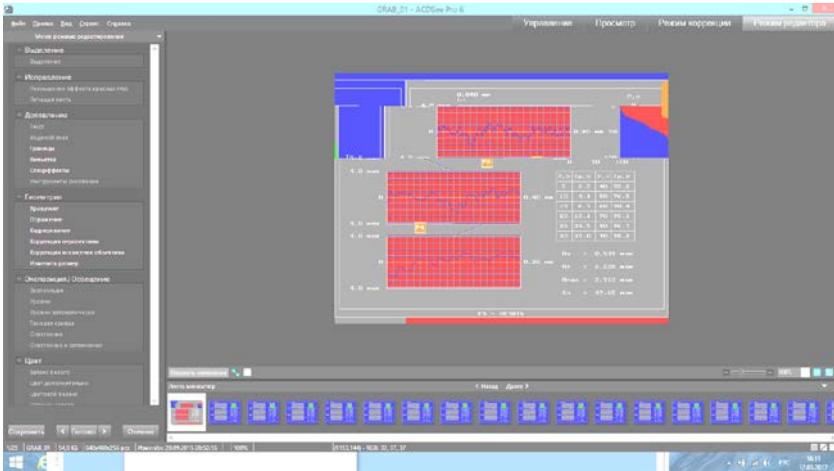


Рис. 1. Пример использования электронных средств в исследовании шероховатости поверхности

Положение оси координат определялось по установленным маркерам  $M_1$  и  $M_2$ . Программа имеет удобную ручную оцифровку, средство для легкой реорганизации точек, возможность сохранения и открывать файлы, позволяет сохранять работу и возвращаться к ней позже. Полученные данные могут быть экспортированы в буфер. Возможен экспорт в форматы: DXF (AutoCAD), EPS (PostScript), и TXT (текстовый файл).

Таким образом можно сделать вывод что для сокращения затрат времени при обработке проведенных экспериментов в современных условиях необходимо комплексно использовать вычислительную технику. Результатом моделирования стало получение трехмерной поверхности, адекватно описывающей текстуру реальной поверхности металла. Трехмерное моделирование позволило провести адекватный анализ образцов и выбрать оптимальный режим обработки поверхности.

### Литература

1. **Волкова М.Ю.** Исследование влияния отделки изделия на формообразование поверхности изделий малой пластики // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011 г., том 3, (С.288-291).
2. **Волкова М.Ю.,** Егорычева Е.В. Влияние качества обработки поверхностей деталей на продление срока службы промышленных изделий // Современные проблемы теории машин. II международная заочная научно-практическая конференция, 20 июня 2014 г., г. Новокузнецк: мат-лы конференции. – Новокузнецк: Издательский центр "СибГИУ". - 2014. - №2. - С.138-140.

УДК 378.14: 004:588: 514.18

Е.В. ЕГОРЫЧЕВА, к.т.н., доцент;  
М.Ю. ВОЛКОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34  
*E-mail: kig@kig.ispu.ru*

## **Использование 3D графики в курсе «Инженерная и компьютерная графика»**

**Аннотация.** В статье рассматривается создание обучающих комплексов с использованием систем автоматизированного проектирования AutoCad, Компас-3D для изучения курса «Инженерная и компьютерная графика».

**Ключевые слова:** обучающие комплексы, компьютерная графика, 3D модели, системы автоматизированного проектирования.

E.V. EGORYCHEVA, cand. tech.sci., associate professor;  
M. VOLKOVA, cand.tech.sci., associate professor

Ivanovo State Power University them.Lenin  
153003, Ivanovo, ul. Rabfakovskaya, d. 34  
*E-mail: kig@kig.ispu.ru*

## **Using of the 3D graphics in the course of the engineering and computer graphics**

**Abstract.** The article deals with the creation of training complexes using the automated design systems AutoCad, Compass-3D for studying the course "Engineering and Computer Graphics".

**Key words:** educational complexes, computer graphics, 3D models, computer-aided design systems.

Выполнение чертежно-проектных работ сегодня уже невозможно представить без использования систем автоматизированного проектирования. Широкое внедрение вычислительной техники влечёт за собой переход от традиционных методов ведения проектно-конструкторских работ к использованию новых, автоматизированных систем разработки и выполнения конструкторской документации. Стремительное развитие компьютерных технологий оказывает сильное влияние на всю систему высшего образования. Это коснулось учебного процесса и методик преподавания. Ярким примером этого процесса является модернизация преподавания курса «Инженерная и компьютерная графика», в состав которого часто входят такие разделы как начертательная геометрия, черчение, компьютерная графика

Инженерная графика для решения геометрических задач использует графический метод. По чертежу можно определить форму и размер

изображённого объекта. Никакое, даже самое подробное описание объекта не может заменить его правильного чертежа. Однако, не всем студентам по традиционным учебникам удастся понять последовательность правильного решения выполнения чертежа. В этой связи представляется актуальным создание новых компьютерных технологий обучения, приближенных к системе дистанционного обучения.

Важной работой при изучении курса «Инженерная и компьютерная графика» является выполнение детализирования сборочного чертежа. По сборочному чертежу детали собирают в сборочные единицы или окончательное изделие. С помощью сборочных чертежей определяется взаимное расположение деталей и их соединение, сопряжение, крепление. В обучающем комплексе для наиболее полного понимания устройства изделий, представленных на сборочных чертежах, создается библиотека трехмерных моделей этих изделий, выполненных в системах AutoCad или Компас-3D [1]. Трехмерные модели сборки представляют внешнюю и внутреннюю конфигурацию изделий. Пользователь может последовательно разбирать модель изделия на отдельные сборочные единицы и детали для определения их конфигурации и выполнения чертежей (рис. 1).

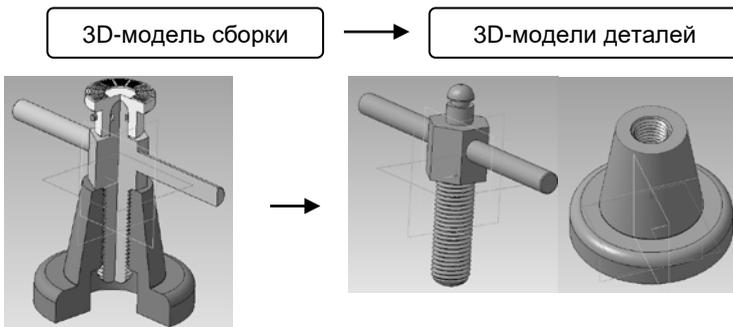


Рис.1. Определение конфигурации деталей по сборочному чертежу

Такая же технология применяется и к изучению резьбовых соединений представляется сборочный чертеж с возможностью сборки-разборки, изучения его составляющих деталей (рис. 2).

Также система трехмерного твердотельного моделирования Компас-3D позволяет создать параметризованные геометрические модели. Механизм параметризации при работе с геометрическими моделями позволяет получать набор однотипных моделей изделий на основе спроектированной модели, изменяя конкретные числовые значения переменных, также вносить необходимые изменения в модель путем изменения ее переменных.

Это дает возможность применять параметризованную модель детали в качестве основы при выполнении студентами своих заданий [2]. Для создания резьбы на поверхностях 3D моделей разработана библиотека профилей различных типоразмеров. Используя созданный профиль можно выполнить резьбу на определенную длину с определенным шагом резьбы. Также с помощью технологии параметризации появилась возможность модифицировать довольно сложные сборочные единицы. Использование указанной технологии действительно позволило существенно сократить время, затрачиваемое на разработку, модификацию и редактирование моделей.

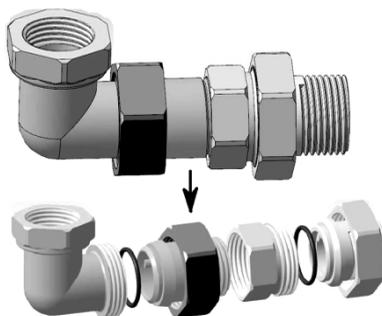


Рис. 2. Определение конфигурации деталей резьбового соединения

При изучении раздела «Начертательная геометрия» у студентов довольно часто возникают затруднения с пониманием выполнения задач на построение линии пересечения различных поверхностей. Для решения этой проблемы создается база трехмерных моделей пересекающихся поверхностей. Пользователь имеет возможность рассмотреть модель со всех сторон, выполнить чертеж пересекающихся поверхностей. Это значительно повышает степень наглядности задания, упрощает построение линии пересечения.

Использование комплексов с использованием систем автоматизированного проектирования AutoCad, Компас-3D позволило усовершенствовать качественный подход к подготовке студентов технических специальностей и облегчить подготовку студентов при изучении курса «Инженерная и компьютерная графика».

#### Литература

1. **Анализ** графической подготовки студентов художественных специальностей технических вузов / Е.В. Егорычева, М.Ю. Волкова // Новый университет. Серия "Технические науки": Журнал.– Йошкар-Ола: ООО "Коллоквиум".– 2013.– №10. – С.4 –7.
2. **Информационное** обеспечение в современных технологиях обучения графическим дисциплинам / С.А. Новожилова, Е.В. Егорычева // Геометрия и графика: Журнал.– Москва: ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М".– 2013.– №3.– т.1, ч.1. – С.33–35.

3. **Геометрическое** моделирование в современных технологиях обучения курсу "Инженерная и компьютерная графика" / Е.В. Егорычева, С.А. Новожилова, Е.П. Милосердов // Новый университет. Серия "Технические науки": Журнал. Йошкар-Ола: ООО "Коллоквиум". 2013. №7.– С.4 – 8.

УДК 624.9

А.И. ЛАПОЧКИН, к.т.н., доцент,  
А.А. СИДОРОВ к.п.н.  
Н.А. СЕРГУНИН,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: aleynikov-av@ya.ru, zav@toe.ispu.ru*

### **Расчёт освещенности скоростного шоссе**

**Аннотация.** Произведено сравнение освещенности участка шоссе отечественными и импортными светильниками с различными типами ламп.

**Ключевые слова:** металлогенные лампы, натриевые лампы высокого давления.

N.A. SERGUNIN;  
A.I. LAPOCHKIN Ph.D., cand. tech.sci., associate professor;  
A.A. SIDOROV Ph.D.  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: aleynikov-av@ya.ru, zav@toe.ispu.ru*

### **Calculation of the illumination of the highway**

**Annotation.** The illumination of the highway section by domestic and imported lamps with different types of lamps is compared.

**Key words:** metal halide lamps, high pressure sodium lamps.

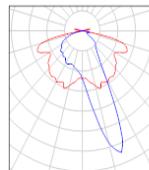
Освещение дорог является важной частью безопасности дорожного движения. Для расчетов освещенности была использована специальная программа, которая моделирует любое помещение или открытое пространство и с учётом особенностей помогает воссоздать картину будущего освещения. Эта программа называется "DIALux 4.11".

Сравнивались 2 вида светильников. Отечественный производитель - "Galad 00038 ГКУ15-250-105 Сириус" и иностранный производитель - "Elektroskandia 4520043 Streetus 7440d/5 PL V2L3- Philips CDO-TT 150W/828" (рис. 1).

После построения проектов обеих моделей было выяснено, какое расстояние необходимо брать между фонарными столбами, их высоту, угол наклона мачты, длину вылета для достижения необходимой освещенности в тёмное время суток (рис. 2).

Улица 1 / Ведомость светильников

GALAD 00038 ГКУ15-250-105 Сириус  
 № изделия: 00038  
 Световой поток (Светильник): 15600 lm  
 Световой поток (Лампы): 20000 lm  
 Мощность светильников: 250,0 W  
 Классификация светильников по CIE: 99  
 CIE Flux Code: 39 68 95 99 77  
 Комплектация: 1 x МГЛ 250 Вт (Поправочный коэффициент 1.000).



Улица 1 / Ведомость светильников

Elektroskandia 4520043 Streetus 7440d/5-150 PL V2L3 - Philips CDO-TT 150W/828  
 № изделия: 4520043  
 Световой поток (Светильник): 10108 lm  
 Световой поток (Лампы): 13500 lm  
 Мощность светильников: 170,0 W  
 Классификация светильников по CIE: 100  
 CIE Flux Code: 42 79 100 96 75  
 Комплектация: 1 x Philips CDO-TT 150W/828 (Поправочный коэффициент 1.000).

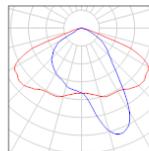
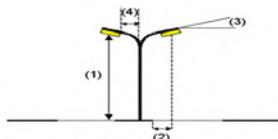
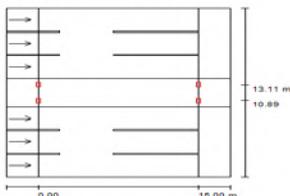


Рис. 1. Светильники производителей "Galad 00038 ГКУ15-250-105 Сириус" "Elektroskandia 4520043 Streetus 7440d/5 PL V2L3- Philips CDO-TT 150W/828"

Структуры светильников



Светильник:  
 Световой поток (Светильник): 10108 lm  
 Световой поток (Лампы): 13500 lm  
 Мощность светильников: 170,0 W  
 Расположение: на средней полосе  
 Расстояние между мачтами: 15,000 m  
 Монтажная высота (1): 10,273 m  
 Высота световых точек: 10,000 m  
 Вылет (2): -0,870 m  
 Наклон консоли (3): 5,0 °  
 Длина консоли (4): 1,106 m

Elektroskandia 4520043 Streetus 7440d/5-150 PL V2L3 - Philips CDO-TT 150W/828  
 Наибольшие значения силы света при 70°: 460 cd/klm  
 при 80°: 38 cd/klm  
 при 90°: 1,35 cd/klm  
 В все направлениях, которые образуют указанный угол с нижней вертикалью в установленных и полных к работе светильниках.  
 Сила света не выше 95°  
 Комплектация отвечает классу силы света G4.  
 Комплектация отвечает классу индекса ослепления D 6.

Список критеральных полей

- Критеральное поле Проезжая часть 2  
 Длина: 23,000 m, Ширина: 10,000 m  
 Растр: 10 x 9 Точки  
 Участвующие элементы дороги: Проезжая часть 2.  
 Покрытие: R3, ф0: 0,070  
 Выбранный класс освещенности: ME2

Фактические расчетные значения:  
 Фактические значения согласно классу:  
 Выполняется/не выполняется:

(Все фотометрические условия соблюдены.)

$I_{\text{об}}$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	U1	Tl [%]	SR
1.52	0.47	0.76	7	0.55
≥ 1.50	≥ 0.40	≥ 0.70	≤ 10	≥ 0.50
✓	✓	✓	✓	✓

- Критеральное поле Сред. полоса 1  
 Длина: 23,000 m, Ширина: 4,000 m  
 Растр: 10 x 3 Точки  
 Участвующие элементы дороги: Сред. полоса 1.  
 Выбранный класс освещенности: CE5

Фактические расчетные значения:  
 Фактические значения согласно классу:  
 Выполняется/не выполняется:

(Все фотометрические условия соблюдены.)

$E_{\text{в}}$ [lx]	U0
20.92	0.81
≥ 7.50	≥ 0.40
✓	✓

Рис. 2.

Были сравнены затраты необходимые для того, чтобы осветить километр трассы. Расчёты показали следующее:

1) Отечественные светильники должны быть расположены на расстоянии в 23 метра. Стоимость светильника- 5567.28 руб. Затраты на 1 км составили 242055 руб.

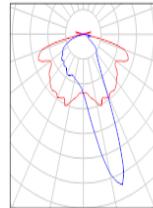
2) При использовании импортных светильников расстояние между столбами составило 15 метров. Стоимость ламп для светильника 1578 руб. Стоимость плафона компании "Philips" - 2344 руб. Стоимость 1 км дороги 261466, 66 руб.

Таким образом, затраты 1 км освещения дороги отечественными светильниками обойдётся на 19411 руб. дешевле по сравнению с импортными.

Для сравнения металлогенных ламп и натриевых ламп высокого давления сравнивалось 2 типа светильников отечественного производителя: металлогенный (МГЛ) светильник "Galad 00038 ГКУ15-250-105 Сириус" и натриевый светильник высокого давления(НЛВД) - "Galad 00114 ЖКУ16-400-001 Лидер" (рис. 3).

#### Улица 1 / ВЕДОМОСТЬ СВЕТИЛЬНИКОВ

GALAD 00038 ГКУ15-250-105 Сириус  
 № изделия: 00038  
 Световой поток (Светильник): 15600 lm  
 Световой поток (Лампы): 20000 lm  
 Мощность светильников: 250.0 W  
 Классификация светильников по CIE: 99  
 CIE Flux Code: 39 68 95 99 77  
 Комплектация: 1 x МГЛ 250 Вт (Поправочный коэффициент 1.000).



#### Улица 1 / ВЕДОМОСТЬ СВЕТИЛЬНИКОВ

GALAD 00114 ЖКУ16-400-001 Лидер  
 № изделия: 00114  
 Световой поток (Светильник): 36782 lm  
 Световой поток (Лампы): 48000 lm  
 Мощность светильников: 400.0 W  
 Классификация светильников по CIE: 100  
 CIE Flux Code: 43 73 96 100 76  
 Комплектация: 1 x Д/НаТ 400 Вт (Поправочный коэффициент 1.000).

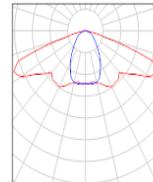


Рис. 3.

После построения 3-х мерного проекта освещённости данными светильниками выявлена разница в световых потоках этих светильников (рис. 4).

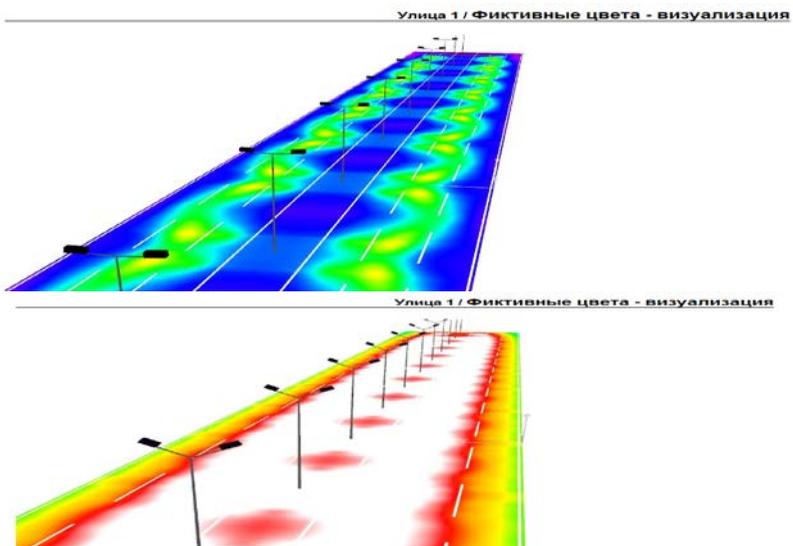
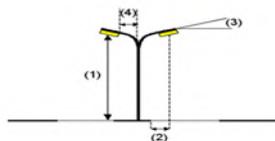
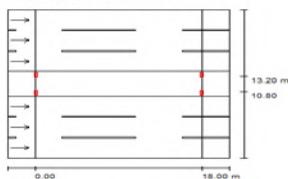


Рис. 4.

Так натриевая лампа высокого давления по сравнению с металлогенной имеет больший световой поток при той же мощности. Но натриевая лампа высокого давления имеет спектр излучения от оранжевого до жёлтого, а металлогенная от жёлтого до синего. Другими словами, цветовой поток МГЛ намного ближе к естественному, значит легче воспринимается человеческим зрением, что позволяет лучше ориентироваться водителю. Но при этом потребляет больше энергии.

Структуры светильников



Светильник:	GALAD 00114 ЖСУ16-400-001 Лидер	Наибольшие значения силы света
Световой поток (Светильник):	36792 lm	при 70°: 449 cd/kdm
Световой поток (Лампы):	48000 lm	при 90°: 254 cd/kdm
Мощность светильников:	400.0 W	при 90°: 98 cd/kdm
Расположение:	на средней полосе	в 40-градусных направлениях, которые образуют угловой угол с нижней вертикалью в
Расстояние между мачтами:	18.000 m	инсталлированных и потопых к работе светильника.
Монтажная высота (1):	10.826 m	Компоновка отвечает классу индекса освещения D.6.
Высота световых точек:	11.000 m	
Вылет (2):	-0.500 m	
Наклон консоли (3):	30.0 °	
Длина консоли (4):	1.201 m	

Из этого следует, что натриевые лампы предпочтительнее, но излучают менее привычный свет для глаз, а металлогенные лампы потребляют больше электричества, но излучают свет близкий к естественному.

УДК 004.9

Н.Н. ЕЛИЗАРОВА, к.т.н., доцент,  
Т.В. ГВОЗДЕВА, к.э.н., зав. кафедрой ИТ

«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: elisarova@it.ispu.ru, gvozdevs@inbox.ru*

### **Создания обучающих модулей на основе дистанционных образовательных технологий**

**Аннотация.** Разработана методика создания обучающих модулей дисциплин, проведена адаптация системы Moodle под систему обучения университета, организован итоговый контроль на основе понятийной структуре дисциплины.

**Ключевые слова:** дистанционные технологии, обучающий модуль, понятийная структура, организация процесса обучения.

N.N. ELIZAROVA, Ph.D., Associate Professor,  
T.V. GVOZDEVA, Ph.D., Head of the IT Department

Ivanovskij gosudarstvennyj jenergetičeskij universitet imeni V.I. Lenina,  
153003, Ivanovo, ul. Rabfakovskaja 34  
*E-mail: elisarova@it.ispu.ru, gvozdevs@inbox.ru*

### **Creations of the teaching modules on the basis of the controlled from distance educational technologies**

**Annotation.** A methodology for creating training modules of disciplines is presented, adaptation of the Moodle system to the university's teaching system is carried out, final control is organized on the basis of the conceptual structure of the discipline.

**Keywords:** the controlled from distance technologies, teaching module, понятийная структура, organization of process of educating.

В современных условиях вопросом организации учебного процесса с использованием виртуальных образовательных сред на базе дистанционных технологий уделяется большое внимание. Одним из наиболее распространенных инструментальных средств, на сегодняшний день является система дистанционного обучения Moodle [1]. Он предлагает широкий спектр возможностей для полноценной поддержки процесса обучения в виртуальной образовательной среде – разнообразные способы организации учебного процесса, представления учебного материала, проверки знаний и контроля успеваемости, коммуникация обучаемого и обучающего и др. Одним из неоспоримых достоинств Moodle является возможность построения информационной среды учебного процесса с учетом его специфики, что обеспечивается гибкими инструментами программного средства.

Технология организации учебного процесса посредством интеграции программного продукта Moodle в информационную среду кафедры была подробно описана в статье [2]. Для совершенствования системы обучения были разработаны специальные модули и проведена адаптация средств Moodle, обеспечивающие комплексную поддержку процессов организации, реализации и контроля учебного процесса [3].

Каждый учебный курс в электронной среде Moodle определен в виде отдельного учебного модуля  $M_i \in M$  (где множество  $M$  задается исходя из учебного плана направления), размещенный в соответствующем семестре  $(S_j \in S)$  созданной иерархической структуры курсов  $K_l: \{ S_l(M_i, i = \overline{1, k_i}), j = \overline{1, m_j} \}, K_l \in K, l = \overline{1, n}$ .

Создание учебных курсов базируется на принципе тематической декомпозиции, что соответствует структуре представления дисциплины в рабочей программе, где курс представляется как иерархически организованное множество разделов (тем)  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_s\}$ , каждый из которых включает компоненты  $g_i = \{P_1, \dots, P_n\}$ , где  $P_i$  – виды занятий, базирующиеся на соответствующей форме (например, лекции, лабораторные занятия и др.) и технологии формирования знаний и умений (рис. 1).

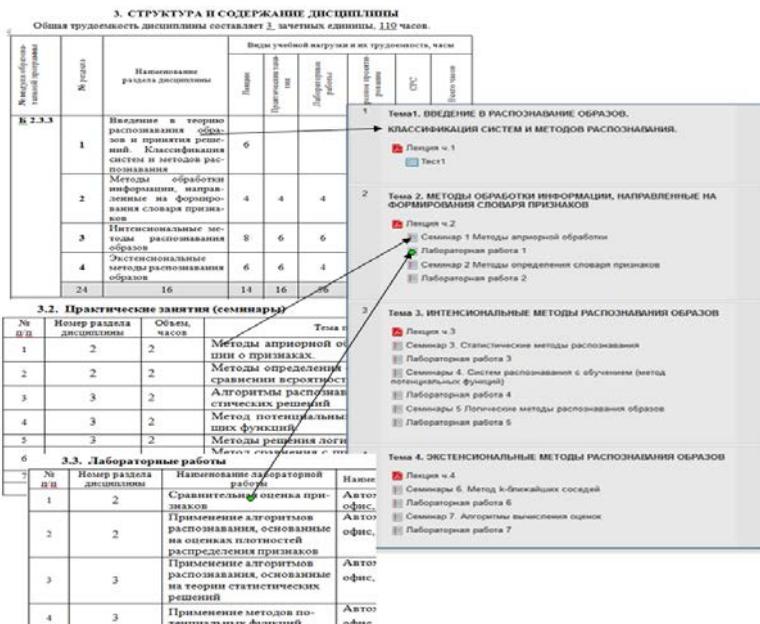


Рис. 1. Разработка структуры курса на основе рабочей программы

Учебный курс включает теоретическую и практическую части:

- *теоретическая часть* направлена на организацию студента в получении знаний посредством используемых компонент (текстовых или графических файлов, web-страниц или ссылок на другие ресурсы Internet).

- *практическая часть* направлена на организацию студента в приобретении умений посредством следующих компонент: заданий, форумов, Wiki-страниц и др.

Представленные компоненты включают элементы контроля, что позволяет вести мониторинг приобретения студентами результатов обучения в рамках компетенций дисциплины.

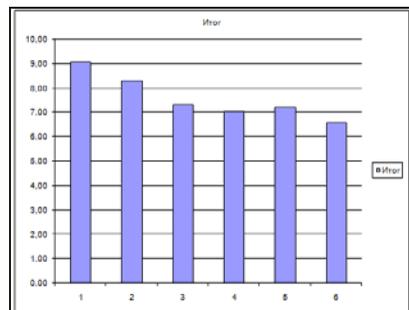
В системе Moodle осуществлена настройка категорий и шкал оценки знаний и умений студентов, которая адаптирована под систему обучения РИТМ университета (текущие и промежуточные контроли).

При таком подходе к организации учебного процесса каждая дисциплина рассматривается как совокупность: методов обучения, направленных на эффективное освоение обучаемыми учебного материала (теоретических знаний – предмет усвоения), приобретение им умений – овладение способами (приемами, действиями), применения усваиваемых знаний на практике; методов контроля знаний и умений, позволяющих своевременно выявить «пробелы» обучаемого и сформировать воздействия.

Итоговый контроль знаний проводится по разработанной понятийной структуре курса, которая строится на основе глоссария. На основе понятийной структуры для каждого обучающегося создается лист опроса для контроля знаний и умений, в котором понятия размещены в случайном порядке (рис. 2а). Проводится опрос и его обработка, на основе которой осуществляется оценка знаний. Примеры результатов обработки приведены на рисунке (рис. 2б).

Теория распознавания образов	
Разов Н.	группа 2-45
понятие	оценка
Метод сравнения с прототипом	4
Дисперсия	10
Метод, основанный на сравнении апостериорных вероятностей	7
Словарь (вектор) признаков	6
Мера близости	10
Гипотеза	10
Матрица оценок (голосов)	7
Алгоритм вычисления оценок	7
Эвристический подход	6

а)



б)

Рис. 2. Пример опроса по понятийной структуре

### Литература

1. **Анисимов А.М.** Работа в системе дистанционного обучения Moodle: учеб. пособие. 2-е изд. испр. и дополн. – Харьков, ХНАГХ, 2009. – 292 с.

2. **Елизарова Н.Н.**, Гвоздева Т.В., Целищев Е.С. Применение дистанционных образовательных технологий для повышения эффективности обучения студентов. "Современные проблемы науки и образования" 2015. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/121-18001>.

3. **Беляков М.Я.**, Гвоздева Т.В. Совершенствование информационной технологии организации учебного процесса на базе дистанционных образовательных сред. Междун. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенард. чтения) т. 3, 2013. – с. 361–364.

УДК 004.432::004.272::004.032.26

В.В. ПЕКУНОВ, д. т. н.

153008, г. Иваново, ул. Колесанова, 2-57

*E-mail: pekunov@mail.ru*

## **Язык параллельного программирования Planning C. Применение при обучении глубоких нейронных сетей на гибридных системах с OpenCL-видеодискретизаторами**

**Аннотация.** Предложен язык параллельного программирования, построенный на базе процедур с планированием повторного входа. Введены виртуальные топологии на базе дедуктивных макромодулей. Предложен подход к обучению нейронных сетей: секционированное обучение с элементами градиентного поиска.

**Ключевые слова:** язык параллельного программирования, виртуальные топологии, порождающее программирование, процедуры с планированием повторного входа, обучение глубоких нейронных сетей

V.V. PEKUNOV, Doctor of Engineering.

153008, Ivanovo, Kolesanova st., 2-57

*E-mail: pekunov@mail.ru*

## **The New Parallel Programming Language Planning C. The Using in Deep Neural Network's Learning on Hybrid CPU/GPU OpenCL-Systems**

**Abstract.** A new parallel programming language based on procedures with planning re-entry is proposed. The virtual topologies based on deductive macro-modules are introduced. The new approach to neural net's learning is proposed: it is a learning by section using some iterations of gradient descent.

**Keywords:** parallel programming language, virtual topologies, generative programming, procedures with planning re-entry, deep neural network's learning

Невзирая на огромное количество языков (или расширений) параллельного программирования, задача простого, адекватного и эффективного представления параллельных алгоритмов до сих пор актуальна, особенно при решении на гибридных вычислительных системах много-

стадийных задач, сочетающих переборные алгоритмы с непереборными. Пример задачи – обучение групп нейронных сетей с применением стадийных вариаций генетического случайного поиска [1].

*Целью работы* является повышение эффективности программирования параллельного решения вычислительно трудозатратных задач (многостадийных, векторных, переборных) на системах разной архитектуры, в том числе задач обучения глубоких нейронных сетей с помощью новых модификаций существующих технологий обучения. Были поставлены две основные задачи: а) разработать новый язык параллельного программирования, достаточно адекватный и эффективный для решения указанных задач, основанный на процедурах с планированием повторного входа, б) предложить новые методы обучения глубоких нейронных сетей, обладающие лучшей сходимостью к решению, эффективно реализуемые на разработанном языке.

Процедуры/функции с планированием повторного входа (ПППВ/ФППВ) [2] являются удобным средством программирования последовательных (предполагающих применение стека, дека или очереди) алгоритмов и параллельных [векторных или конвейерных (стадийных), а также параллельных переборных в идеологии «портфель задач»] алгоритмов. Данные процедуры/функции являются *ключевым элементом* языка Planning C, являющегося *надмножеством* C++.

**Теорема о предельной ПППВ.** Предельной ПППВ является параллельная расширенная машина Тьюринга (ПарРМТ) [2]. Будем считать, что транзакционная память реализуется ПарРМТ программно.

Доказательства теорем данной работы приведены в [2, 3].

**Следствие.** Поскольку ПарРМТ равносильна машине Тьюринга (МТ) [2] и способна к параллельному исполнению фрагментов алгоритма, ПППВ может реализовать любой обычный/параллельный алгоритм.

**Теорема о предельных средствах алгоритмизации на ПППВ (ТА1).** Все основные управляющие конструкторы (процедуры и функции, циклы и ветвление) в алгоритмическом языке в минимальной форме могут быть реализованы с помощью ПППВ/ФППВ, если язык поддерживает сокращенное вычисление логических выражений.

Из вышеуказанных теорем следует *алгоритмическая полнота Planning C*. При этом в язык входят и все классические управляющие операторы C/C++, выбор тех или иных средств опционален.

Помимо стандартных паттернов параллелизма (вектор, конвейер и «портфель задач») язык содержит высокоуровневые средства описания *произвольных вычислительных топологий*: в виде *перечня цепей*, формирующих топологию, или в виде *дедуктивных параметризованных макромодулей*, генерирующих перечень цепей в соответствии с заданными логическими правилами (GNU Prolog), что позволяет гибко подстраивать топологию под задачи. Поскольку дедуктивные макромодули позво-

ляют сгенерировать *произвольный программный код*, их применение позволяет реализовать *порождающее программирование*.

Предложена новая алгебраическая нотация записи топологий, упрощающая их описание в Planning C, реализуемая макромодулем.

Топологии (в том числе вложенные) могут быть запущены *в кластерном и/или в SMP-варианте*. ПППВ в режиме «портфель задач» исполняются только в SMP-варианте, на центральном процессоре (ЦП) *или на произвольном OpenCL-устройстве [ЦП с векторными командами (например, SSE), или многоядерный видеоускоритель]*. Язык также содержит *классические средства поддержки распараллеливания в общей памяти*: семафоры, блокировки, каналы, барьеры, критические секции, транзакционную память. Семафоры, каналы, барьеры и блоки общей памяти поддерживаются также в кластерном варианте.

Разработаны транслятор Planning C и инструментальные средства для портирования MPI-программ на Planning C (SMP-вариант).

Разработан *новый метод обучения глубоких нейронных сетей прямого распространения (путем минимизации функционала ошибок)*, являющийся развитием метода [1]. Итерация метода включает три стадии: а) случайные пробы, б) скрещивание лучших проб с отбором порожденных точек-кандидатов, в) новую стадию – «продвижение» точек-кандидатов путем нескольких итераций градиентного поиска и выбор лучшего результата – исходной точки для следующей итерации. Максимальное число итераций градиентного метода вычисляется на каждой итерации по линейной формуле в зависимости от процента успешных проб. Новый метод показал лучшие результаты (на многоэкстремальной и простой функциях, а также на функции Розенброка) в сравнении с классическим случайным поиском и исходным методом [1].

Данный метод показал хорошие результаты при обучении глубоких нейронных сетей с линейным выходным нейроном с применением следующего *предлагаемого переборно-секционированного подхода*: сеть делится на  $K$  горизонтальных связанных сегментов, после чего выполняется  $(2^k - 1)$  метастадий, на каждой из которых разрешены для модификации параметры одного из подмножеств секций (на последней метастадии модифицируются параметры всех секций). На каждой метастадии решается *задача дообучения*, результаты которой становятся исходными данными на следующей метастадии. Данный метод особенно полезен, если некоторые из сегментов сети включает нейроны с полиномиальными активационными функциями.

Была написана параллельная программа (на Planning C) обучения глубокой нейронной сети с применением предложенных подходов. Ее исполнение на системе с двумя видеоускорителями NVidia Tesla K40 (0,88 ГГц, 2880 потоков) дало *ускорение в 5,09 раз* по сравнению с 16-ядерной 64-потоковой системой платформы Google's Compute Engine с процессорами Xeon 2,6 ГГц с векторными SSE-инструкциями. В результа-

те применения переборно-секционированного подхода было получено среднее значение функционала ошибок в 1,72 раза меньше, чем без такового, а максимальное – в 2,47 раза меньше.

### Литература

1. **Сидоров, С.Г.** Разработка ускоренных алгоритмов обучения нейронных сетей и их применение в задачах автоматизации проектирования: дис. ... канд. тех. наук. – Иваново, 2003. – 161 с.
2. **Пекунов, В.В.** Искусственные нейронные сети прямого распространения. Описание с помощью расширенных машин Тьюринга, вербализация и применение в аэродинамике. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016 . – 177 с.
3. **Пекунов В.В.** Процедуры с планированием повторного входа в программировании. Расширенные машины Тьюринга // Инновационная наука. - 2016. - №6. - Ч.2. - С.128-131.

## СЕКЦИЯ 7.

### «МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И УСТАНОВКАМИ»

УДК 621.34: 62-50

Н.Е. ГНЕЗДОВ<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
С.К. ЛЕБЕДЕВ<sup>2</sup>, к.т.н., доцент,  
А.Р. КОЛГАНОВ<sup>3</sup>, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: gnezdov@list.ru<sup>1</sup>, zerg.lebedev@mail.ru<sup>2</sup>, klgn@drive.ispu.ru<sup>3</sup>*

#### Микроконтроллерное моделирование электромехатронных систем позиционирования

**Аннотация.** В работе рассмотрено микроконтроллерное моделирование на примере электромехатронных систем позиционирования. По сравнению со структурным моделированием в системах компьютерной математики (Simulink) она позволяет сократить время разработки опытного образца, а также открывает новые возможности в создании алгоритмов систем управления.

**Ключевые слова:** электромехатронные системы, микроконтроллерное моделирование.

N.E. GNEZDOV Candidate of Engineering, docent,  
S.K. LEBEDEV Candidate of Engineering, docent,  
A.R. KOLGANOV Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: gnezdov@list.ru<sup>1</sup>, zerg.lebedev@mail.ru<sup>2</sup>, klgn@drive.ispu.ru<sup>3</sup>*

#### Electromechatronic System Simulation on Microcontroller

**Abstract.** Microcontroller simulation technique of electromechatronic positioning system is presented. It allows to shorten time of prototype development and opening new possibilities in control system algorithms design.

**Key words:** electromechatronic systems, microcontroller simulation.

Электропривод является практической областью деятельности, нацеленной, в конечном итоге, на создание оборудования, транспортных средств с улучшенными техническими и экономическими показателями. Моделирование позволяет экономить значительное время и средства при разработке и, безусловно, является необходимым этапом создания электротехнических систем [1, 2]. Широко используемое моделирование в виде структурных схем (структурное), например, в *Simulink Matlab*, *VisSim* [3], просто, наглядно, удобно, позволяет быстро «собрать» нужную модель, но обладает рядом недостатков:

– системы структурного моделирования в конечном итоге все равно переводят модель в систему уравнений и рассчитывают ее в микропроцессоре компьютера. Такой перевод выполняется по формальным правилам и абсолютно закрыто для пользователя. Отмечены случаи, когда результат расчета даже простых элементов не совпадает с ожидаемым по теории. Причем в разных версиях систем компьютерной математики такие ошибки встречаются в разных местах;

– необходимо не только адекватное математическое описание объекта, но и учет особенностей средств реализации управления: квантование, задержка в управляющем микроконтроллере;

– полученный результат – структурный алгоритм нужно «переводить» на язык микроконтроллера, реализовывать в нем.

Первый недостаток можно частично устранить, используя численное моделирование, т.е. представление алгоритмов в виде системы дифференциальных уравнений с ее решением одним из известных методов [1]. Такую возможность предоставляют, например, *Matcad*, *Mathematica*, *S-функции в Simulink* [3]. Однако расчет системы все равно будет произведен одним из методов, реализация которых закрыта для пользователя. Создание собственной программы (фактически системы моделирования) с полностью открытым кодом модели и ее расчета весьма трудоемко и может быть оправдано лишь в редких случаях проектирования широкой линейки оборудования. Кроме того, это не избавляет от необходимости «перевода» модели на язык микроконтроллера.

Можно использовать инструменты автоматической конвертации модели в программный код [4]. Так, у пользователей *Matlab* есть возможность создания программного кода для микроконтроллеров *Analog Device*, *Texas Instruments*, *Freescale*, на основе созданной в *Simulink* модели. Пакет расширения называется *Embedded Coder* [5]. Он выполняет автоматизированный, т.е. по формальным правилам перевод модели из непрерывной в дискретную по времени и значениям переменных и, далее, конвертацию дискретной модели в программный код выбранного микроконтроллера. Как показало практическое применение этого пакета, для успешного выполнения этих действий и получения работоспособного программного кода необходимо соблюсти ряд условий и выполнить несколько дополнительных действий [6], что требует хороших знаний устройства и возможностей целевого микроконтроллера и определенных трудозатрат. Кроме того, полученный программный код неудобен для понимания и корректировки. Предполагается, что синтез и изменение алгоритма выполняется в модели, а программный код без просмотра и корректировки загружается в микроконтроллер.

Сегодня вычислительные мощности используемых в промышленном оборудовании микроконтроллеров и усовершенствованные средства разработки и отладки программ для них позволяют выполнять численное моделирование непосредственно в них [7, 8]. Конечно, микроконтроллер-

ное моделирование требует представления алгоритмов в численной форме, изучения особенностей выбранного микроконтроллера и самостоятельной реализации методов расчета. Но, во-первых, это устраняет ошибки «слепого» применения формальных правил, и, во-вторых, это неизбежные этапы при практической реализации систем.

Отметим, что использование микропроцессорного моделирования подвигает к синтезу алгоритмов в дискретном пространстве, где больше возможностей формирования управляющих воздействий [9]. При этом нет препятствий для реализации алгоритмов, синтезированных в непрерывном пространстве, благодаря исключению квантования по уровню при использовании *float*-формата и не влияющему на точность квантованию по времени в современных микроконтроллерах [10].

Таким образом, применение микроконтроллерного моделирования при создании электротехнических систем расширяет возможности синтеза управления и значительно сокращает путь идей к воплощению в оборудовании, их внедрению.

Авторы накопили достаточный опыт использования микроконтроллерного моделирования в исследовании электромехатронных систем позиционирования [11, 12].

#### Литература

1. **Смит Дж.М.** Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. – М.: Машиностроение. 1980. – 271 с.
2. **Герман-Галкин С.Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт. 2001. – 320 с., ил.
3. **Дьяконов В.П.** Компьютерная математика. Теория и практика. – М.: Нолидж. 2001. – 1296 с., ил.
4. **From MATLAB and Simulink to Real-Time with TI DSPs** [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф., мультимедийные дан. (175,5 Мб). – USA: Texas Instruments. 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с диска. – Диск и сопровод. материалы помещены в пластиковый конверт.
5. **Embedded Coder** [Электронный ресурс]: описание / MathWorks. – Электрон. текстовые и граф. дан. – Режим доступа: <http://matlab.ru/products/embedded-coder>, свободный.
6. **Гнездов Н.Е.** Микропроцессорное моделирование электромехатронных систем: учеб.-метод. пособие / Федеральное агентство по образованию, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново. 2012. – 76 с.
7. **TI brings 16-bit ADC precision performance to industrial control applications with new single-core C2000™ Delfino™ F2837xS microcontrollers** [Электронный ресурс]: сообщение о продукте. – Электрон. текстовые и граф. дан. – Режим доступа: <http://newscenter.ti.com/2014-08-26-TI-brings-16-bit-ADC-precision-performance-to-industrial-control-applications-with-new-single-core-C2000-Delfino-F2837xS-microcontrollers>, свободный.
8. **Code Composer Studio** – Integrated Development Environment [Электронный ресурс]: описание / Texas Instruments. – Электрон. текстовые и граф. дан. – Режим доступа: <http://www.ti.com/tool/ccstudio>, свободный.
9. **Уткин В.И.** Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука. 1981. – 368 с.

10. **Пантелейчук А.** Первые цифровые сигнальные контроллеры с плавающей точкой // Новости электроники. 2007. – №9. – С. 21-22.
11. **Колганов А.Р.** Современные методы управления в электромеханотронных системах. Разработка, реализация, применение: учеб. пособие / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов. – Федеральное агентство по образованию, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново. 2012. – 256 с.
12. **Гнездов Н.Е.**, Лебедев С.К., Колганов А.Р. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ HVPCMTR ISPU. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2016663678 от 13.12.2016.

УДК 62-83

Б.С. КУРНЫШЕВ<sup>1</sup>, д.т.н., профессор,  
М.А. СОЛОМАНИЧЕВ<sup>2</sup>, старший преподаватель,  
Д.С. КИСЕЛЕВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: bor403@yandex.ru<sup>1</sup>, solm@drive.ispu.ru<sup>2</sup>, sma24sma@yandex.ru<sup>2</sup>*

### **Инвариантное описание динамики процессов в асинхронном электроприводе**

**Аннотация.** Рассмотрена методология инвариантного описания динамики электромагнитных и электромеханических процессов в регулируемом асинхронном электроприводе. Методология основана на тензорном математическом аппарате. Рассмотрены основные соотношения и методика применения тензоров.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, регулирование скорости электропривода, динамика электромагнитных процессов.

B.S. KURNYSHEV, Doctor of Engineering, professor,  
M.A. SOLOMANICHEV, senior Teacher,  
D.S. KISELEV, master student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: bor403@yandex.ru<sup>1</sup>, solm@drive.ispu.ru<sup>2</sup>, sma24sma@yandex.ru<sup>2</sup>*

### **Invariant description of the dynamics of processes in the asynchronous electric drive**

**Abstract.** Invariant description of the dynamics of electromagnetic and mechanical processes in the controlled asynchronous electric drive was developed. Methodology based on tensor analysis. Basic relations and methods of application of tensors were considered.

**Key words:** asynchronous electric drive, speed control of electric drive, dynamics of electromagnetic processes.

В теории электропривода и других электротехнических систем обычно используют координатное описание динамики, однако всякий переходный процесс является объективным физическим процессом, не зависит от выбора системы координат и, следовательно, не требует их обязательного применения. Способ такого инвариантного описания динамики рассмотрен ниже.

Исходные соотношения [1, 3]:

$$\Psi = Li; \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Psi_i = \Psi_i(i^1, i^2, \dots, i^n) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \\ i^k = i^k(\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n) \quad (k = 1, 2, \dots, n); \end{cases} \quad (2)$$

$$d\Psi_i = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{\partial \Psi_i}{\partial i^k} di^k \equiv \frac{\partial \Psi_i}{\partial i^k} d\tau^k = L_{ik} di^k; \quad (3)$$

$$\begin{cases} l_{ik} = S_{ik} + A_{ik}, \quad l_{ki} = S_{ik} - A_{ik}, \\ S_{ik} = \frac{l_{ik} + l_{ki}}{2}, \quad A_{ik} = \frac{l_{ik} - l_{ki}}{2}, \\ S_{ik} = S_{ki}, \quad A_{ik} = -A_{ki}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} S_{ik} = |\mathbf{e}_i| |\mathbf{e}_k| \cos \alpha_{ik}, \\ A_{ik} = |\mathbf{e}_i| |\mathbf{e}_k| \sin \alpha_{ik} = -|\mathbf{e}_k| |\mathbf{e}_i| \sin \alpha_{ki} = -A_{ki}, \\ S_{ik}^2 + A_{ik}^2 = |\mathbf{e}_i|^2 |\mathbf{e}_k|^2 \cos^2 \alpha_{ik} + |\mathbf{e}_i|^2 |\mathbf{e}_k|^2 \sin^2 \alpha_{ik} \equiv |\mathbf{e}_i|^2 |\mathbf{e}_k|^2; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} d\Psi = \mathbf{e}^i d\Psi_i + \Psi_i d\mathbf{e}^i = \mathbf{e}_k d\Psi^k + \Psi^k d\mathbf{e}_k, \\ d\mathbf{i} = \mathbf{e}_k di^k + i^k d\mathbf{e}_k = \mathbf{e}^i di_i + i_i d\mathbf{e}^i, \\ d\Psi = \mathbf{e}^i d\Psi_i + \Psi_i d\mathbf{e}^i = \mathbf{e}_k d\Psi^k + \Psi^k d\mathbf{e}_k; \end{cases} \quad (6)$$

$$d\Psi \cdot d\Psi = \|d\Psi\|^2 = d\Psi_k d\Psi^k = l_{ki} d\Psi^i d\Psi^k; \quad (7)$$

$$L = -\frac{d\Psi}{d\Psi} \cdot \frac{d\Psi}{d\Psi} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}; \quad (8)$$

$$\delta S = a\delta \int_{-\tau}^{+\tau} \left( -\frac{d\Psi}{d\Psi} \cdot \frac{d\Psi}{d\Psi} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \right) d\Psi = 0; \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{Du_i}{d\tau} + I_{ik} u^k + S_{ik}^j u_j u^k = 0, \\ I_{ik} = \frac{\partial u_i}{\partial \tau^k} - \frac{\partial u_k}{\partial \tau^i}, \\ S_{ik}^j = \frac{\partial \mathbf{e}^j}{\partial \tau^i} \mathbf{e}_k - \frac{\partial \mathbf{e}^j}{\partial \tau^k} \mathbf{e}_i. \end{cases} \quad (10)$$

Применительно к описанию электромагнитных процессов в двигателе асинхронного электропривода уравнения (1)–(10), согласно изложенному методу, могут быть представлены в следующем (тензорном) виде [2, 4–7]:

$$\begin{cases} \frac{D\psi_k}{dt} + R_{mk} i^m = U_k \quad (k, m = 1, 2, \dots, n), \\ D\psi_k = d\psi_k + \Gamma_{mk}^j \psi_j dx^m + S_{mk}^j \psi_j dx^m, \\ \psi_k = L_{km} i^m, \\ M_{\mathcal{E}} = -\frac{\partial W_{\mathcal{E}}}{\partial \phi}, \end{cases}$$

где  $\psi_k$  – компоненты вектора  $\boldsymbol{\psi} = \psi_k \mathbf{e}^k$  (потокосцепления);  $R_{mk}$  – компоненты тензора  $\mathbf{R} = R_{mk} \mathbf{e}^m \mathbf{e}^k$  (диссипативной составляющей);  $i^m$  – компоненты вектора  $\mathbf{i} = i^m \mathbf{e}_m$  (тока);  $U_k$  – компоненты вектора  $\mathbf{U} = u_k \mathbf{e}^k$  (напряжения);  $\Gamma_{mk}^j$  – символ Кристоффеля;  $x^m$  – координаты;  $S_{mk}^j$  – компоненты тензора кручения;  $L_{km}$  – компоненты тензора  $\mathbf{L} = L_{km} \mathbf{e}^k \mathbf{e}^m$  (индуктивной составляющей);  $M_{\mathcal{E}}$  – электромагнитный момент;  $W_{\mathcal{E}}$  – полный запас электромагнитной энергии.

### Литература

1. Мак-Коннел. Введение в тензорный анализ с приложениями к геометрии, механике и физике. – М.: Физматгиз. 1963. – 412 с.
2. Курнышев Б.С., Колодин И.Ю. Минимизация структуры бескоординатной модели асинхронного двигателя тензорным методом // Электротехника. 1997. – №7. – С. 34-37.
3. Архангельский Н.Л., Курнышев Б.С., Лебедев С.К., Фильченков А.А. Тензорная методология в теории электропривода переменного тока // Изв. вузов. Электромеханика. 1993. – №1. – С. 66-74.

4. **Архангельский Н.Л.**, Курнышев Б.С., Захаров П.А. Применение тензорной методологии к описанию электромагнитных процессов в асинхронном двигателе // Электричество. 1995. – №2. – С. 37-39.
5. **Курнышев Б.С.**, Виноградов А.Б. Инвариантное представление векторных переменных в асинхронном электроприводе // Сб. тр. «Оптимизация режимов работы систем электроприводов». – Красноярск: КПИ. 1992. – С. 3-8.
6. **Курнышев Б.С.**, Захаров П.А. Инвариантное описание процессов в асинхронном электроприводе // Сб. тр. «Электрооборудование промышленных установок». – Н. Новгород: НГТУ. 1995. – С. 55-60.
7. **Курнышев Б.С.**, Колодин И.Ю. Применение тензорного метода для минимизации структуры бескоординатных моделей асинхронного двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. 1997. – №6.

УДК 62-83

Б.С. КУРНЫШЕВ<sup>1</sup>, д.т.н., профессор,  
М.А. СОЛОМАНИЧЕВ<sup>2</sup>, старший преподаватель,  
Д.С. КИСЕЛЕВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: bor403@yandex.ru<sup>1</sup>, solm@drive.ispu.ru<sup>2</sup>, sma24sma@yandex.ru<sup>2</sup>*

### **Преобразование тензорных уравнений процессов в асинхронном электроприводе к векторной форме**

**Аннотация.** Разработана методика преобразования тензорных уравнений к векторной форме. Методика основана на двух формах записи тензорных уравнений: ковариантной и контравариантной. Составлена таблица бескоординатных векторных аналогов.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, регулирование скорости электропривода, динамика электромагнитных процессов.

B.S. KURNYSHEV Doctor of Engineering, professor,  
M.A. SOLOMANICHEV senior Teacher,  
D.S. KISELEV master student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: bor403@yandex.ru<sup>1</sup>, solm@drive.ispu.ru<sup>2</sup>, sma24sma@yandex.ru<sup>2</sup>*

### **The transformation of tensor equations of processes in the asynchronous electric drive to vector form**

**Abstract.** Methods of transformation of tensor equations to vector form was developed. The technique is based on two forms of tensor equations: covariant and contravariant. Tables becoordinated vector analogues were derived.

**Key words:** asynchronous electric drive, speed control of electric drive, dynamics of electromagnetic processes.

Тензорный метод описания нелинейных электромагнитных и электро-механических процессов в асинхронных электроприводах позволяет представить нелинейности (например, эффект вытеснения тока, кривая намагничивания и др.) в виде инвариантных моделей в криволинейных пространствах состояний [1]. При переходе от таких моделей к векторным моделям требуются формулы соответствующего перехода. Система основных таких формул рассмотрена ниже.

Исходные уравнения [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_S}{dt} + R_1 i_S &= u_S; \quad \frac{d\psi_R}{dt} + R_2 i_R = u_R; \\ \frac{d\psi^S}{dt} + R_1 i^S &= u^S; \quad \frac{d\psi^R}{dt} + R_2 i^R = u^R; \\ \psi_S &= L_1 i_S + L_m \Omega_S^R i_R; \quad \psi_R = L_2 i_R + L_m \Omega_R^S i_S; \\ \psi^S &= L_1 i^S + L_m \Omega_R^S i^R; \quad \psi^R = L_2 i^R + L_m \Omega_S^R i^S. \end{aligned}$$

Переход к векторным моделям осуществляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} i_S i^S &\equiv \sum_{S=1}^{S=2} i_S i^S = |\vec{i}_S|^2; \quad i_S \psi^S \equiv \sum_{S=1}^{S=2} i_S \psi^S = \vec{i}_S \cdot \vec{\psi}_S; \\ i_R i^R &\equiv \sum_{R=3}^{R=4} i_R i^R = |\vec{i}_R|^2; \quad i_R \psi^R \equiv \sum_{R=3}^{R=4} i_R \psi^R = \vec{i}_R \cdot \vec{\psi}_R; \\ \psi_S \psi^S &\equiv \sum_{S=1}^{S=2} \psi_S \psi^S = |\vec{\psi}_S|^2; \quad \psi_R \psi^R \equiv \sum_{R=3}^{R=4} \psi_R \psi^R = |\vec{\psi}_R|^2; \\ i_S U^S &\equiv \sum_{S=1}^{S=2} i_S U^S = \vec{i}_S \cdot \vec{U}_S; \quad \psi_S U^S \equiv \sum_{S=1}^{S=2} \psi_S U^S = \vec{\psi}_S \cdot \vec{U}_S; \\ \Omega_S^R i^S i_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \Omega_S^R i^S i_R = \vec{i}_S \cdot \vec{i}_R; \quad \Omega_R^S i_S i^R \equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \Omega_R^S i_S i^R = \vec{i}_S \cdot \vec{i}_R; \\ \Omega_S^R i^S \psi_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{R=3S=1} \Omega_S^R i^S \psi_R = \vec{i}_S \cdot \vec{\psi}_R; \\ \Omega_R^S i_S \psi^R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{R=3S=1} \Omega_R^S i_S \psi^R = \vec{i}_S \cdot \vec{\psi}_R; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Omega_S^S i^R \Psi_S &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^S i^R \Psi_S = \vec{i}_R \cdot \vec{\Psi}_S ; \\ \Omega_S^R i_R \Psi^S &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^R i_R \Psi^S = \vec{i}_R \cdot \vec{\Psi}_S ; \\ \Omega_S^R \Psi^S \Psi_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^R \Psi^S \Psi_R = \vec{\Psi}_S \cdot \vec{\Psi}_R ; \\ \Omega_S^S \Psi_S \Psi^R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^S \Psi_S \Psi^R = \vec{\Psi}_S \cdot \vec{\Psi}_R ; \\ \Omega_S^R U^S \Psi_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^R U^S \Psi_R = \vec{U}_S \cdot \vec{\Psi}_R ; \\ \Omega_S^S U_S \Psi^R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^S U_S \Psi^R = \vec{U}_S \cdot \vec{\Psi}_R ; \\ \Omega_S^R i^S U_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^R i^S U_R = \vec{i}_S \cdot \vec{U}_R ; \quad \Omega_S^S i_S U^R \equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^S i_S U^R = \vec{i}_S \cdot \vec{U}_R ; \\ \Omega_S^R \Psi^S U_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^R \Psi^S U_R = \vec{\Psi}_S \cdot \vec{U}_R ; \quad \Omega_S^S \Psi_S U^R \equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \Omega_S^S \Psi_S U^R = \vec{\Psi}_S \cdot \vec{U}_R ; \\ Q_S^S \Omega_S^R i^S i_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \left( i^S i_R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_S^R \right) = |\vec{i}_S \times \vec{i}_R| ; \\ Q_S^S \Omega_S^S i_S i^R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \left( i_S i^R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_S^S \right) = |\vec{i}_S \times \vec{i}_R| ; \\ Q_S^S \Omega_S^R U^S i_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \left( U^S i_R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_S^R \right) = |\vec{U}_S \times \vec{i}_R| ; \\ Q_S^S \Omega_S^S U_S i^R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \left( U_S i^R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_S^S \right) = |\vec{U}_S \times \vec{i}_R| ; \\ Q_S^S \Omega_S^R \Psi^S i_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \left( \Psi^S i_R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_S^R \right) = |\vec{\Psi}_S \times \vec{i}_R| ; \\ Q_S^S \Omega_S^S \Psi_S i^R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \left( \Psi_S i^R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_S^S \right) = |\vec{\Psi}_S \times \vec{i}_R| ; \\ Q_S^S \Omega_S^R i^S U_R &\equiv \sum_{R=3S=1}^{R=4S=2} \sum_{S=1} \left( i^S U_R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_S^R \right) = |\vec{i}_S \times \vec{U}_R| ; \end{aligned}$$

$$Q_S^S \Omega_R^S i_S U^R \equiv \sum_{R=3}^{R=4S-2} \sum_{S=1}^{S=2} \left( i_S U^R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_R^S \right) = \left| \vec{i}_S \times \vec{U}_R \right|;$$

$$Q_S^S \Omega_R^S i_S \Psi^R \equiv \sum_{R=3}^{R=4S-2} \sum_{S=1}^{S=2} \left( i_S \Psi^R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_R^S \right) = \left| \vec{i}_S \times \vec{\Psi}_R \right|;$$

$$Q_S^S \Omega_R^S i_S \Psi^R \equiv \sum_{R=3}^{R=4S-2} \sum_{S=1}^{S=2} \left( i_S \Psi^R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_R^S \right) = \left| \vec{i}_S \times \vec{\Psi}_R \right|;$$

$$Q_S^S \Omega_R^S \Psi_S \Psi^R \equiv \sum_{R=3}^{R=4S-2} \sum_{S=1}^{S=2} \left( \Psi_S \Psi^R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_R^S \right) = \left| \vec{\Psi}_S \times \vec{\Psi}_R \right|;$$

$$Q_S^S \Omega_R^S \Psi_S \Psi^R \equiv \sum_{R=3}^{R=4S-2} \sum_{S=1}^{S=2} \left( \Psi_S \Psi^R \sum_{S=1}^{S=2} Q_S^S \Omega_R^S \right) = \left| \vec{\Psi}_S \times \vec{\Psi}_R \right|.$$

### Литература

1. **Мак-Коннел.** Введение в тензорный анализ с приложениями к геометрии, механике и физике. – М.: Физматгиз. 1963. – 412 с.
2. **Архангельский Н.Л.,** Курнышев Б.С., Захаров П.А. Применение тензорной методологии к описанию электромагнитных процессов в асинхронном двигателе // Электричество. 1995. – №2. – С. 37-39.

УДК 621.6

М.А. ЗАХАРОВ<sup>1</sup>, ассистент,  
П.А. ЗАХАРОВ, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: mazoid@gmail.com<sup>1</sup>

## Динамическая модель синхронного двигателя

**Аннотация.** В статье представлена методика разработки бескоординатной модели синхронного двигателя, в которой входными величинами являются модуль и частота вращения вектора напряжения статора и модуль вектора напряжения обмотки возбуждения.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель, математическая модель.

M.A. ZAKHAROV, assistant,  
P.A. ZAKHAROV, Candidate of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: mazoid@gmail.com<sup>1</sup>

## Synchronous motor dynamic model

**Abstract.** The paper presents a methodology for the development of the model coordinate-free synchronous motor in which the input values are the module and the speed of the stator voltage vector and the magnitude of the field winding voltage.

**Key words:** synchronous motor, mathematical model.

Средний возраст энергетического оборудования, эксплуатируемого на компрессорных станциях «Газпром», превосходит 20 лет. В связи с этим, во избежание возникновения аварийной ситуации, большое внимание должно уделяться определению технического состояния энергетического оборудования. Для решения этой задачи, а также во избежание возникновения аварийной ситуации на компрессорных станциях (КС), большое внимание должно уделяться определению технического состояния их энергетического оборудования. Ключевым звеном любой КС является газоперекачивающий агрегат (ГПА). В настоящее время работы по диагностике электрических газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) ведутся в двух направлениях: вибродиагностика ЭГПА и непосредственная инструментальная диагностика электрического двигателя. Однако получаемой информации не достаточно, поскольку данные виды диагностики не дают полного представления о техническом и энергетическом состоянии газоперекачивающего агрегата.

Эксплуатация ЭГПА с неудовлетворительными техническими и энергетическими показателями ведет к дополнительным эксплуатационным расходам и может вызвать аварийные ситуации со стороны синхронного двигателя (СД), являющегося приводным механизмом и со стороны нагнетателя (Н) (рабочего механизма). Это приведет к существенным материальным затратам по восстановлению нормального функционирования данного объекта.

Создание системы мониторинга и диагностики технического и энергетического состояния приводного механизма ЭГПА является задачей технически актуальной и экономически целесообразной. Разработка и создание технических средств контроля, защиты и диагностирования СД повысит надежность эксплуатации как самого двигателя, так и всего ЭГПА в целом.

Для решения этих задач целесообразны создание стационарной системы комплексного диагностического обследования ЭГПА, а также

разработка методики и комплекса мероприятий по проведению данного типа работ.

Синхронный двигатель, как объект автоматического управления, представляет собой сложную динамическую структуру, описываемую системой нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. По этой причине применение такого описания в разработках систем управления синхронным электроприводом в большинстве случаев оказывается проблематичным. Практически, чаще всего в задачах управления, пользуются упрощенными линеаризованными вариантами динамических моделей, что приводит на практике к ухудшению качества процессов регулирования синхронного электропривода.

Главная особенность бескоординатных моделей синхронного двигателя состоит в том, что они не содержат ни одной периодически изменяющейся переменной. Входными величинами в этих моделях являются модуль и частота вращения вектора напряжения статора и модуль вектора напряжения обмотки возбуждения.

В качестве исходной принимается тензорная модель синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением без демпферной обмотки [1]:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_s}{dt} + R_1 I_s = U_s, \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f I_f = U_f, \\ \Psi_s = L_s I_s + L_{sf} \Omega_f^f I_f, \\ \Psi_f = L_{sf} \Omega_s^s I_s + L_f I_f, \end{cases}$$

где  $\Psi_s$ ,  $\Psi_f$  – потокосцепления статора и обмотки возбуждения;  $R_1$ ,  $R_f$  – активные сопротивления обмотки статора и обмотки возбуждения;  $I_s$ ,  $I_f$  – токи статора и обмотки возбуждения;  $L_s$ ,  $L_f$ ,  $L_{sf}$  – индуктивности обмоток статора и возбуждения и взаимная индукция статора и обмотки возбуждения;  $\Omega_s^s$ ,  $\Omega_f^f$  – тензоры вращения.

В результате преобразований исходных уравнений получается система, содержащая 12 дифференциальных уравнений в форме Коши. Данных систем может быть получено 6 [2] в зависимости от компонентов векторов, относительно которых решается исходная система.

Для проверки адекватности модели было проведено математическое моделирование в программной среде Simulink MatLab. В качестве исследуемого был взят синхронный двигатель марки СТД-630-2РУХЛ4 (мощность 630 кВт, напряжение статора 6000 В, частота вращения 3000 об/мин, критическая частота вращения 2390 об/мин, момент инерции ротора 0,053 т·м<sup>2</sup>, ток статора (фазный) 71 А, cos φ = 0,9, КПД 95,8%,

напряжение обмотки возбуждения 31 В, ток возбуждения 245 А, сопротивление фазы статора  $R_s = 1,096$  Ом, индуктивность обмотки статора  $L_s = 0,00019$  Гн, взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и обмоткой статора  $L_{sf} = 0,00019$  Гн, сопротивление обмотки возбуждения  $R_f = 0,690$  Ом, индуктивность обмотки возбуждения  $L_f = 0,000473$  Гн).

Все 6 полученных моделей показали одинаковые результаты при исследовании статических и динамических режимов работы двигателя.

#### Литература

1. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. – М.: Госэнергоиздат. 1950. – 435 с.
2. Захаров П.А., Захаров А.М. Исследование переходных режимов работы АД // Электротехника. 2000. – №3.

УДК 681.586

А.Н. ШИРЯЕВ<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
А.А. ДОБРОХОТОВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
E-mail: shiryayev\_aleksandr@mail.ru<sup>1</sup>

### Моделирование устройств вычисления показателей статических и динамических характеристик электропривода

**Аннотация.** Предложены модели устройств вычисления показателей статических и динамических характеристик электропривода, приведены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** электропривод, модели в среде Matlab, результаты моделирования.

A.N. SHIRYAEV, Candidate of Engineering, docent,  
A.A. DOBROKHOTOV, master student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: shiryayev\_aleksandr@mail.ru<sup>1</sup>

### Modeling of computing devices of indicators of static and dynamic electric drive characteristics

**Abstract.** The models of computing devices of indicators of static and dynamic electric drive characteristics are proposed, the results of modeling are given.

**Key words:** electric drive, models in the Matlab environment, results of modeling.

При исследовании электропривода широко используется имитационное моделирование в среде Matlab. В результате моделирования определяются статические характеристики электропривода, такие, как погрешность скорости в заданном диапазоне ее регулирования, и динамические – величина перерегулирования и время регулирования при обработке задающего и возмущающего воздействий.

В работе предлагаются простые модели устройств вычисления относительной погрешности скорости  $\delta\Omega$ , %, величины перерегулирования и времени регулирования скорости ( $\sigma_\Omega$ , % и  $t_{p\Omega}$ ) и момента ( $\sigma_M$ , % и  $t_{pM}$ ) электропривода при скачкообразном изменении задающего и возмущающего воздействий. Этими моделями может быть дополнена модель системы электропривода, созданная в среде Matlab.

Модель устройства вычисления относительной погрешности скорости (УВПС) в Matlab построена на основе выражения

$$\delta\Omega, \% = \left( \frac{\Omega_3 - \Omega_p}{\Omega_3} \right) \cdot 100,$$

где  $\delta\Omega$ , % – относительная погрешность скорости;  $\Omega_3$  и  $\Omega_p$  – заданное и регулируемое значения угловой скорости.

Модели устройств вычисления показателей динамических характеристик разработаны на основе устройства вычисления показателей качества (УВПК) переходного процесса (рис. 1), в ходе которого УВПК вычисляет две переменные вида

$$Y = (x/x_c - 1) \cdot 100;$$

$$Z = \begin{cases} t, & \text{если } (x/x_c) < (1-\Delta) \text{ или } (x/x_c) > (1+\Delta); \\ 0, & \text{если } (1-\Delta) \leq (x/x_c) \leq (1+\Delta). \end{cases}$$

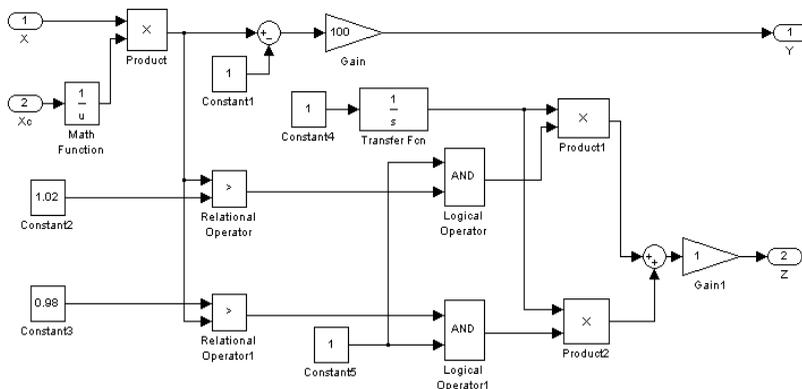


Рис. 1. Математическая модель УВПК

Максимальные значения этих переменных, полученные в ходе переходного процесса, и есть перерегулирование  $Y_{\max} = \sigma$ , % и время регулирования  $Z_{\max} = t_p$  соответственно, а  $x$  и  $x_c$  – текущее и заданное (установившееся) значения регулируемой величины.

Значение «коридора»  $\Delta$  определяется, как правило, допустимой установившейся погрешностью регулируемой переменной.

Величина  $\Delta$ , % в модели на рис. 1 принята  $\pm 2\%$ .

На рис. 2 приведена модель в среде Matlab системы электропривода «преобразователь-двигатель постоянного тока» (П-ДПТ), дополненная УВПС и УВПК.

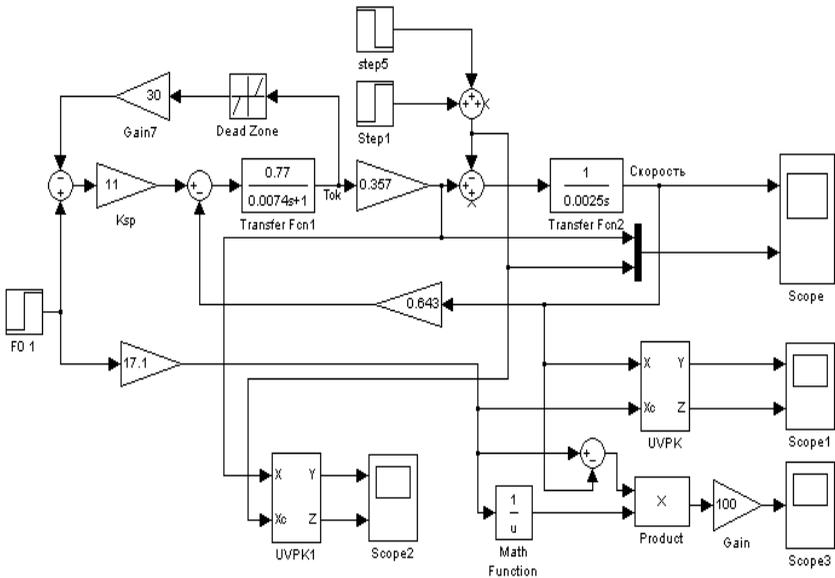


Рис. 2. Математическая модель системы электропривода П-ДПТ

На рис. 3 приведены графики переходных процессов системы П-ДПТ при пуске электродвигателя (ЭД) на номинальную скорость, набросе и сбросе номинального момента ( $M_c = M_n$ ), а на рис. 4–6 – графики выходных сигналов УВПК и УВПС, по которым вычисляются показатели статических и динамических характеристик электропривода.

По графикам (рис. 4–6) можно легко и с необходимой точностью вычислить показатели статических и динамических характеристик электропривода.

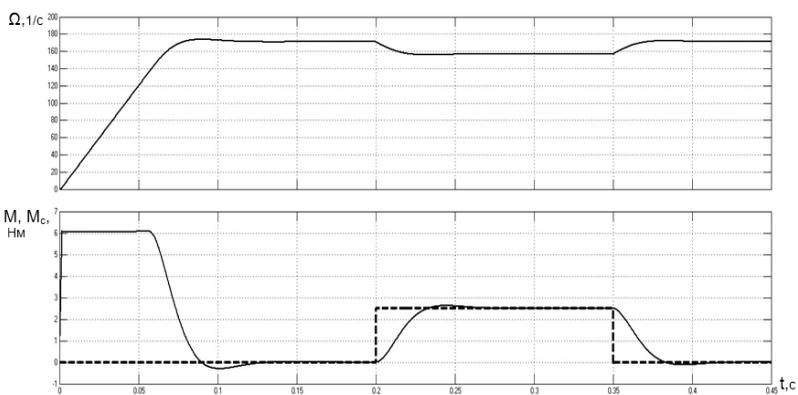


Рис. 3. Пуск ЭД на  $\Omega = \Omega_0$ , наброс – сброс  $M_c = M_n$  (блок Score на рис. 2)

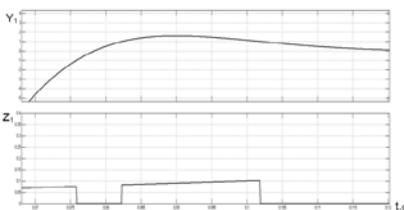


Рис. 4. Графики для вычисления  $\sigma_\Omega$ , % и  $t_{p\Omega}$  (блок Score 1 на рис. 2)

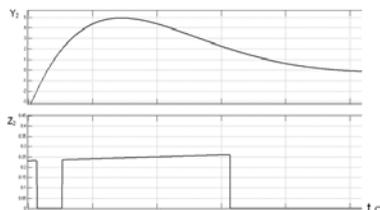


Рис. 5. Графики для вычисления  $\sigma_M$ , % и  $t_{pM}$  (блок Score 2 на рис. 2)

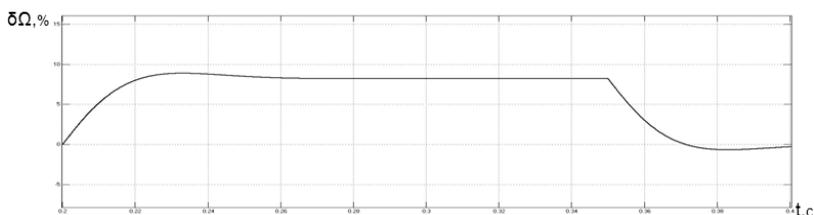


Рис. 6. График относительной погрешности скорости (блок Score 3 на рис. 2)

Так, величина перерегулирования скорости  $\sigma_\Omega = 1,8\%$ , время регулирования  $t_{p\Omega} = 0,1$  с, число колебаний – одно колебание (рис. 4). Величина перерегулирования момента  $\sigma_i = 5\%$ , время регулирования  $t_{pM} = 0,065$  с, число колебаний – одно колебание (рис. 5). Величина относительной погрешности скорости (при  $M_c = M_n$ )  $\delta\Omega = 8\%$  (рис. 6).

УДК: 629.357:62-833.6:629.3.073

А.А. КОРОТКОВ, к.т.н., М.А. СИБИРЦЕВ, инженер,  
В.Л. ЧИСТОСЕРДОВ<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
А.Б. ВИНОГРАДОВ<sup>2</sup>, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: val4is@mail.ru<sup>1</sup>, vinogr\_ab@mail.ru<sup>2</sup>

## Управление карьерным самосвалом в режиме проскальзывания

**Аннотация.** Использование электромеханических трансмиссий в промышленных транспортных средствах высокой грузоподъемности требует внедрения современных систем безопасности движения в различных погодных и дорожных условиях. К таким элементам относятся системы антиблокировки и антипробуксовки, используемые в настоящее время практически во всех автомобилях.

**Ключевые слова:** электропривод, трансмиссия, антиблокировка, антипробуксовочная система.

A.A. KOROTKOV Candidate of Engineering,  
M.A. SIBIRTSEV Engineer,  
V.L. CHISTOSERDOV Candidate of Engineering, docent,  
A.B. VINOGRADOV Doctor of Engineering, professor.

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: val4is@mail.ru<sup>1</sup>, vinogr\_ab@mail.ru<sup>2</sup>

## Control of Mine Dump Truck in the Anti-spin mode

**Abstract.** Use of electromechanical transmissions in industrial heavy payload vehicles requires the implementation of elements that are considered to be traditional in conventional cars. In particular, anti-spin (ESP) and anti-block (ABS) systems that concern to these elements are widely spread nowadays practically in all regular road cars.

**Key words:** electric drive, transmission, anti-block system, anti-spin system.

Применение электромеханической трансмиссии в транспортных средствах, имеющих большой собственный вес и грузоподъемность, таких как, например, карьерные самосвалы, является общемировой практикой. К этому классу трансмиссий относится, в частности, комплект тягового электрооборудования (КТЭО), разработанный концерном «РУСЭЛПРОМ» для карьерного самосвала БелАЗ грузоподъемностью 240 тонн. Комплект включает в себя синхронный генератор (СГТ), приводимый дизельным двигателем, два тяговых асинхронных двигателя, каждый из которых вращает одно из колес ведущего заднего моста, и шкаф приборов систем управления (ШПСУ). Управление напряжением, вырабатываемым тяговым генератором, реализовано по цепи возбуждения. Тяговые двигатели

управляются индивидуальными полупроводниковыми инверторами напряжения, звено постоянного напряжения которых получает питание от выпрямителей напряжения статорной обмотки синхронного генератора [1].

Данный экземпляр трансмиссии проходил комплекс испытаний на Сафоновском электромашиностроительном заводе (СЭЗ) в г. Сафоново и на полигоне завода БелАЗ в г. Жодино.

Общее управление поведением трансмиссии и движением самосвала осуществляет входящий в состав электрической трансмиссии контроллер верхнего уровня (КВУ). Он реализует управление на основании сигналов органов управления самосвала (педали газа и тормоза, положения рычагов выбора направления движения и ручного тормоза), текущей скорости самосвала, скорости дизельного двигателя и состояния оборудования. Этот же контроллер управляет и скоростью вращения дизельного двигателя в зависимости от мощности, требуемой для реализации текущего режима движения самосвала.

Современные системы управления промышленными транспортными средствами должны поддерживать все большее количество функций, обеспечивающих удобство управления и безопасность. Одной из них является функция предотвращения проскальзывания колес, т.е. предотвращение блокировки ведущих колес при торможении и пробуксовки при разгоне самосвала.

Система антиблокировки и система антипробуксовки используют одинаковый принцип работы, выбор между ними определяется лишь текущим режимом движения самосвала (разгон или торможение определяется соотношением знаков текущей скорости и крутящего момента на каждом из тяговых двигателей). Управление каждым колесом осуществляется индивидуально, т.е. обе системы являются многоканальными (в отличие от устаревшего варианта одноканальной системы [2], выполняющего управление одновременно всеми колесами).

Режимы блокировки и пробуксовки для каждого колеса идентифицируются по превышению значения его углового ускорения, принятого для текущей скорости движения самосвала как максимально возможное ускорение без проскальзывания. Наличие датчиков скорости на ведомых колесах позволило бы идентифицировать данный режим более достоверно (при условии отсутствия нажатия водителем на педаль пневматической тормозной системы). Установка таких датчиков предполагается для дальнейшего совершенствования трансмиссии.

В случае обнаружения попадания колеса в режим проскальзывания КВУ трансмиссии начинает мгновенно переключать сигнал управления крутящим моментом тягового двигателя этого колеса между уровнем текущего задания и нулевым уровнем. Переключение с нулевого уровня задания момента на уровень текущего задания, поступающего от органов управления, выполняется по одному из следующих условий:

- 1) обнаружены условия выхода колеса из состояния проскальзывания;

2) превышено максимальное время нахождения задания крутящего момента в нулевом состоянии.

Испытания работы обоих алгоритмов проводились летом и осенью 2015 г. на заводском полигоне БелАЗ в г. Жодино. Температура окружающей среды за время испытаний колебалась в диапазоне от +30°C до +10°C. Автомобиль передвигался по грунтовой поверхности в сухом и сыром (во время и после дождя) состоянии. Движение осуществлялось как по горизонтальной поверхности, так и под уклон до 11%. Испытания проводились как на разгруженном самосвале (без кузова и с одиночными колесами на ведущем мосту вместо штатных двойных), так и в нормальной конфигурации со штатной нагрузкой (200 тонн).

В результате испытаний было установлено:

– ведущие колеса практически не блокируются (в процессе торможения скорость колес никогда не снижается до 0, если автомобиль реально движется);

– в условиях сухого дорожного покрытия длина тормозного пути не увеличилась по сравнению с режимом работы без использования антиблокировки. При этом в случае экстренного резкого торможения (педаль в пол) отсутствует явная блокировка ведущих колес и повреждения дорожного покрытия (борозды глубиной до 5–10 см от ведущих колес), которые возникают в этом режиме при отключении антиблокировки;

– отсутствуют поперечные колебания кузова самосвала в момент торможения, которые при неправильной настройке антиблокировки/ антипробуксовки возникают из-за попеременного вхождения колес в проскальзывание.

### Литература

1. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е., Журавлев С.В., Сибирцев А.Н. Результаты разработки и испытаний комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн // Электротехника. 2015. – №3. – С. 39-45.
2. **Вонг Дж.** Теория наземных транспортных средств: пер. с англ. – М.: Машиностроение. 1982. – 284 с., ил.

УДК: 629.357:62-833.6:629.3.073

А.А. КОРОТКОВ, к.т.н.,  
М.А. СИБИРЦЕВ, инженер,  
В.Л. ЧИСТОСЕРДОВ<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
А.Б. ВИНОГРАДОВ<sup>2</sup>, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: val4is@mail.ru<sup>1</sup>, vinogr\_ab@mail.ru<sup>2</sup>

## Управление карьерным самосвалом в режиме удержания

**Аннотация.** Современные системы управления электромеханическими трансмиссиями, используемыми транспортными средствами большой грузоподъемности, в частности карьерными самосвалами, позволяют в настоящее время реализовывать многие функции, обеспечивающие большую безопасность движения и удобство управления. К таким функциям можно отнести функцию предотвращения отката (удержание автомобиля на месте). Данная функция особенно актуальна для большегрузных карьерных самосвалов, в которых электромеханическая трансмиссия используется как основное средство торможения и останова самосвала, механическая тормозная система предназначена для случаев аварийного отказа и штатного выключения трансмиссии.

**Ключевые слова:** электропривод, трансмиссия, контур удержания.

A.A. KOROTKOV, Candidate of Engineering,  
M.A. SIBIRTSEV, Engineer,  
V.L. CHISTOSERDOV, Candidate of Engineering, docent,  
A.B. VINOGRADOV, Doctor of Engineering, professor.

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: val4is@mail.ru<sup>1</sup>, vinogr\_ab@mail.ru<sup>2</sup>

## Control of Mine Dump Truck in Stationary Position Mode

**Abstract.** Nowadays modern electromechanical transmission control systems used by vehicles with high payload, such as mine dump trucks, make it possible to realize many functions providing significant traffic safety and drive convenience. The rollback prevention function (that keeps truck from moving) is one of them. This function is especially urgent for heavy dump trucks, that uses electromechanical transmission as the main braking system, mechanical brake system is intended for emergency failure and in case of transmission shutdown.

**Key words:** electric drive, transmission, position loop.

Электромеханические трансмиссии традиционно применяются в транспортных средствах с большой грузоподъемностью, таких как карьерные самосвалы. В данной статье рассматривается электромеханическая трансмиссия, разработанная концерном «РУСЭЛПРОМ» для карьер-

ного самосвала БелАЗ грузоподъемностью 240 тонн. Трансмиссия включает в себя синхронный генератор с регулируемым возбуждением, два асинхронных электропривода с автономными полупроводниковыми инверторами напряжения, звенья постоянного напряжения которых получают питание от выпрямленного напряжения статорной обмотки синхронного генератора, и шкаф приборов систем управления (ШПСУ). Асинхронные тяговые двигатели приводят в движение индивидуально правое и левое колесо заднего ведущего моста [1].

Общее управление режимами движения самосвала реализует контроллер верхнего уровня (КВУ). В соответствии с положением органов управления, текущей скоростью движения самосвала и общим состоянием трансмиссии он вырабатывает задания крутящего момента тяговых электродвигателей, уровня напряжения генератора и скорости вращения дизельного двигателя. Программное обеспечение данного контроллера реализует, в частности, и режимы, удерживающие самосвал от непроизвольного скатывания.

Удержание самосвала на месте (т.е. предотвращение его непроизвольного скатывания под уклон) требуется в следующих режимах:

- если автомобиль стоит на месте, не удерживаемый никаким механическим тормозом, и при этом водитель не возобновляет движение;
- если автомобиль останавливается выбегом, либо торможением;
- в случае если водитель инициировал движение, но задание крутящего момента от педали акселератора недостаточно для начала движения.

В связи с этим при реализации режима удержания требовалось решить следующие задачи:

- синтезировать структуру контура удержания, обеспечивающего снижение скорости самосвала до нулевой, и выполнить настройку на оптимальную для данного режима динамику;
- разработать алгоритм входа в режим удержания при снижении скорости автомобиля независимо от текущего режима движения;
- разработать алгоритм выхода из режима удержания для начала движения.

При разработке контура удержания самосвала было принято решение об использовании отдельных контуров для каждого из тяговых электроприводов.

Оба контура имеют одинаковую структуру, которая представлена на рис. 1.

Структура регулятора удержания, реализованная в КВУ (на рис. 1 выделена пунктирной линией), имеет два входа с обратной связью по углу и по скорости и один выход – задание крутящего момента электропривода. Структура объекта управления представлена упрощенной моделью тягового электропривода с векторным управлением в виде аperi-

одического звена (постоянная времени  $T_M$ ) и абсолютно жесткой механической частью с моментом инерции  $J_K$ .

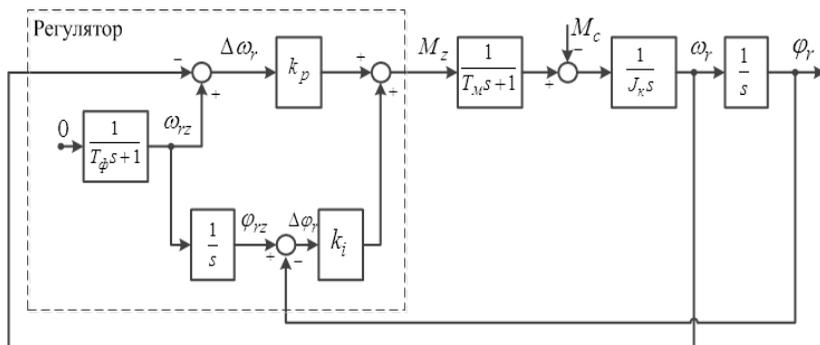


Рис. 1. Структура системы и объекта управления, использовавшаяся для синтеза контура удержания

Проверка работоспособности режимов движения самосвала выполнялась на заводском полигоне БелАЗ в г. Жодино. Самосвал осуществлял движения с различными скоростями во всем рабочем диапазоне (от 0 до 60 км/ч – вперед и до 10 км/ч – назад) по различным участкам полигона, различающимся как покрытием (асфальт и грунтовая поверхность), так и уклоном (горизонтальные участки, движение вверх и вниз с уклоном от 8% до 11%). Испытания проводились при отсутствии груза и при загрузке, близкой к номинальной.

В результате было установлено:

- в процессе останова наблюдается явление отката – после полного останова самосвал начинает двигаться в противоположном направлении и только после этого останавливается. Однако путем правильной настройки регулятора положения величина отката была снижена до величины, не превышающей 0,7 м, что при диаметре колеса самосвала около 3 м считается незначительным;
- режим удержания работает надежно, не допуская скатывание самосвала ни при каких условиях;
- режим удержания не препятствовал нормальному движению самосвала во всем диапазоне скоростей.

#### Литература

1. **Виноградов А.Б.**, Гнездов Н.Е., Журавлев С.В., Сибирцев А.Н. Результаты разработки и испытаний комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн // Электротехника. 2015. – №3. – С. 39-45.

УДК 62-82:621.3

И.Н. РЯБЦОВ<sup>1</sup>, студент,  
Ю.П. СПИЧКОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: Ryabtsov-in@mail.ru<sup>1</sup>*

## **Бездатчиковый асинхронный электропривод продольно-строгального станка**

**Аннотация.** Показана необходимость модернизации электропривода продольно-строгального станка 7210. Дан анализ его технологического процесса строгания и обоснована возможность использования отечественного бездатчикового электропривода серии ЭПВ-VS.

**Ключевые слова:** модернизация, векторно-управляемый электропривод переменного тока, тахограмма и нагрузочная диаграмма, зависимость тягового усилия, бездатчиковый регулируемый электропривод ЭПВ с модулем управления VS.

I.N. RYABTSOV, student,  
Yu.P. SPICHKOV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: Ryabtsov-in@mail.ru<sup>1</sup>*

## **Asynchronous sensorless electric drive spiral planer machine**

**Abstract.** The need for modernization of the electric planing mill 7210. The analysis of the technological process of planing and the possibility of using domestic Sensorless electric drive EPV series-VS.

**Key words:** modernization, vector-controlled AC drive, the speed diagram and load diagram, the dependence of traction, sensorless adjustable electric drive EPV with control modules VS.

В условиях существенного падения отечественного станкостроения остро встает вопрос о модернизации находящегося в эксплуатации металлообрабатывающего оборудования. И здесь особое значение приобретает, прежде всего, модернизация его электропривода с целью приближения его технических данных к показателям вновь проектируемых более прогрессивных моделей новых станков. Проведенный анализ существующих систем управления электроприводов показал целесообразность применения частотно-регулируемых электроприводов с векторным управлением.

Рассматривая приведенные выше доводы, становится ясно, что вопрос модернизации и реконструкции устаревшего парка металлообрабатывающих станков носит актуальный характер.

Сейчас зарубежные производители предлагают большой ассортимент электроприводов переменного тока на базе частотно-регулируемых преобразователей. Однако в условиях существующей экономической ситуации эта продукция не может быть выбрана ввиду значительной стоимости и недостатка информации, необходимой при проектировании и, прежде всего, при эксплуатации. В настоящее время ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПРИ» предлагает отечественные преобразователи частоты «ЭПВ-V».

В ходе проводимых в рамках данной работы исследований рассмотрен электропривод главного движения стола металлорежущего станка. За базу выбран продольно-строгальный станок модели 7210.

Данные станки предназначены, в основном, для обработки резцами плоских горизонтальных поверхностей. Здесь перемещение стола осуществляется от электродвигателя через редуктор и ременную передачу. Снятие стружки с обрабатываемой детали (строгание) происходит при ходе стола вперед (прямой или рабочий ход). Привод должен быть и управляемым по скорости, так как для различных материалов используются свои оптимально допустимые скорости строгания и движение стола характеризуется различными скоростями на разных интервалах времени рабочего цикла.

Ход стола назад (обратный ход) совершается обычно с повышенной скоростью и снятие стружки не производится (холостой ход) – резцы автоматически отведены от обрабатываемой поверхности. Нагрузка двигателя здесь составляет порядка 10–20% от номинальной.

Изменение направления движения стола и его скорости у таких станков производится, или при помощи электромагнитных реверсивных муфт, или посредством реверсирования главного двигателя.

Электропривод главного движения таких станков должен обеспечивать скорость прямого хода 30...60 м/мин, а скорость обратного хода  $V_{обр} = 40...100$  м/мин.

Данные механизмы таких станков имеют небольшой уровень рабочих скоростей и, следовательно, небольшой их диапазон, но имеют высокий уровень скоростей обратных перемещений. На рис. 1 приведены примерная тахограмма и нагрузочная диаграмма работы станка за один рабочий цикл строгания [1].

В реальных условиях электропривод движения стола продольно-строгального станка работает в перемежающемся режиме с частыми реверсами. При этом, согласно характеристики усилия резания (рис. 2), усилие резания  $Q_r$  уменьшается с увеличением скорости строгания  $V_c$ .

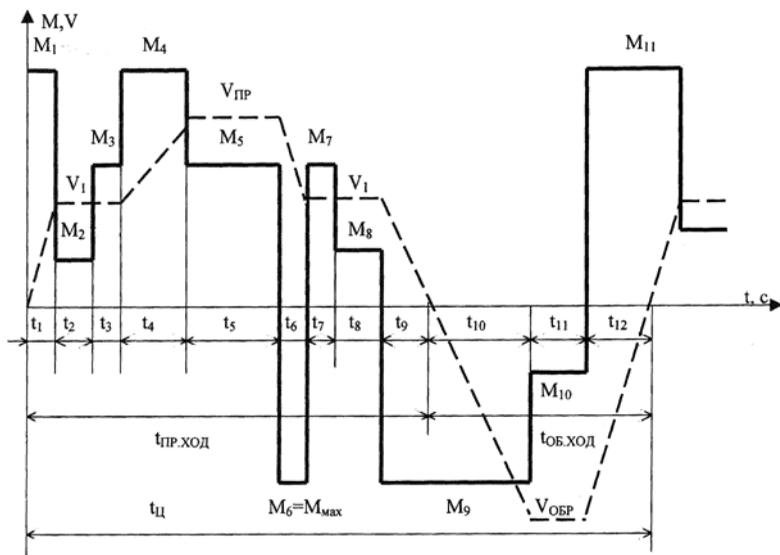


Рис. 1. Тахограмма и нагрузочная диаграмма работы станка

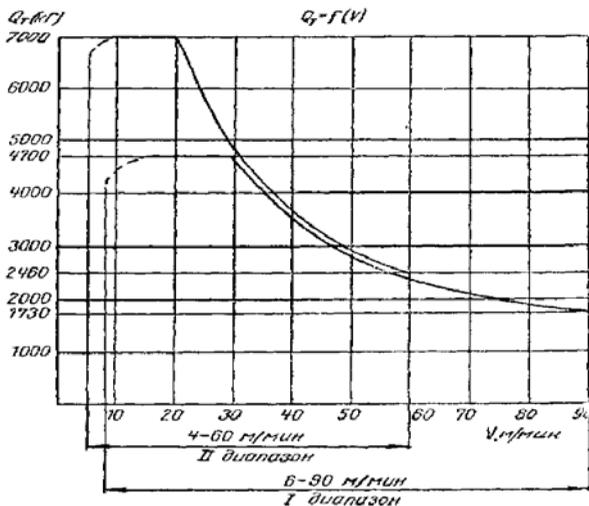


Рис. 2. График зависимости тягового усилия от скорости рабочего хода стола станка модели 7210

Отсюда следует, что для более полного использования двигателя по мощности целесообразно использовать двухзонное регулирование его скорости. Это также позволит отказаться от редуктора и более полно автоматизировать технологический процесс обработки строганием.

Невысокие требования к статическим и динамическим характеристикам станка дают возможность использовать в качестве привода бездатчиковый асинхронный электропривод ЭПВ с модулей управления VS [2]. Функция его автоматического энергосбережения оптимизирует магнитный поток электродвигателя в соответствии с текущими величинами нагрузки и скорости вращения. Ошибка по скорости в установившемся режиме – не более 1%.

В основу исследований данного электропривода положена математическая модель асинхронного двигателя в системе координат  $dq$ , ориентированной по магнитной оси ротора.

Проведенные исследования с использованием математических моделей в среде MATLAB показали, что такой электропривод обладает лучшей перегрузочной способностью, а, следовательно, и лучшей динамикой по сравнению с ранее установленным электроприводом постоянного тока.

При этом улучшаются условия работы механизмов станка, благодаря исключению динамических ударов. Применение таких приводов позволяет создать новую технологию энергосбережения, в которой не только экономится электроэнергия, но и увеличивается срок службы электродвигателей и технологического оборудования.

#### Литература

1. **Верейна Л.И.** Обработка на строгальных и долбежных станках: справочник. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение. 2002. – 304 с.
2. **Виноградов А.Б.**, Чистосердов В.Л., Колодин И.Ю. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2007. – №3. – 10 с.

## СЕКЦИЯ 8. «МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ»

УДК 621.313.333

С.В. КОНДИРОВА, магистрант,  
В.В. АПОЛОНСКИЙ

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: skondirova@mail.ru<sup>1</sup>, vlad-apolonskiy@yandex.ru<sup>2</sup>*

### **Повышение робастных свойств САУ путем коррекции неблагоприятных параметров регулятора**

**Аннотация.** Предложен метод количественной оценки скорректированных параметров регулятора, основанный на анализе детализированных областей робастности, для повышения параметрической грубости САУ при сохранении основных показателей качества системы.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, область робастности, полиномиальный регулятор.

S.V. KONDIROVA student,  
V.V. APOLONSKIY

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: skondirova@mail.ru<sup>1</sup>, vlad-apolonskiy@yandex.ru<sup>2</sup>*

### **Improving robust properties of the ACS by correction of adverse parameters of the controller**

**Abstract.** A method of quantitative estimation of the corrected parameters of the regulator based on the analysis of the detailed areas of robustness is proposed to increase the parametric robustness of the automatic control system while maintaining the main quality indicators of the system.

**Key words:** automatic control system, robustness region, polynomial regulator.

Одним из важных этапов синтеза систем автоматического управления (САУ) является выбор желаемого распределения корней ее характеристического полинома, что позволяет обеспечить заданные показатели качества (время переходного процесса, перерегулирование и т.д.). Применяемые в большинстве случаев, для выполнения поставленных требований, стандартные полиномы на основе бинома Ньютона, распределения Баттерворта, Бесселя или Чебышева не позволяют обеспечить желаемую робастность системы при отклонении параметров объекта от расчетных значений вследствие наличия положительных

обратных связей или неминимально-фазовых звеньев в структуре регулятора.

Решение данной проблемы может быть достигнуто путем видоизменения заданного распределения полюсов САУ за счет коррекции неблагоприятных параметров регулятора.

Предлагаемый подход основан на анализе «областей робастности» замкнутой системы, что является дальнейшим развитием метода построения «областей устойчивости» [1], и отражает степень отклонения переходных характеристик САУ от эталонного значения при вариации параметров регулятора, что позволяет с высокой точностью определить допустимые отклонения коэффициентов, формирующих неминимально-фазовые звенья, от их начального значения при сохранении приемлемого качества управления.

В качестве примера рассмотрим систему автоматического управления с динамическим полиномиальным регулятором объектом второго порядка с передаточной функцией:

$$H_o(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{s + 5}{s^2 + 5s + 6}.$$

Зона робастности САУ с полноразмерным полиномиальным регулятором «входа-выхода» (ПР1/1) для рассматриваемого объекта будет находиться в пределах:  $\Omega_0 \in (1.9; 9.91) \text{ с}^{-1}$ .

Для расчета коэффициентов регулятора примем в качестве желаемого распределение Ньютона и желаемое время переходного процесса  $t_n = 0.5 \text{ с}$ . Для получения необходимой величины среднегеометрического отклонения  $\Omega_0$  воспользуемся соотношением, предложенным в [2]:

$$\Omega_0 = \frac{n + 2\sqrt{n-1}}{t_n} = \frac{3 + 2\sqrt{3-1}}{0.5} = 11.66 \text{ с}^{-1},$$

где  $n$  – степень желаемого характеристического полинома САУ.

Подставляя полученное значение в уравнение синтеза ПР [2, 3], получаем следующие коэффициенты полиномов регулятора:

$$R(s) = r_1 s + r_0 = -24.2s + 251.8;$$

$$C(s) = c_1 s + c_0 = s + 54.2.$$

На графиках 1, 2 (рис 1, а) представлены переходные характеристики для исходной САУ и при увеличении параметра  $b_1$  на 30% соответственно, анализ которых показывает повышенную чувствительность к изменению параметра ОУ, что, в свою очередь, негативно сказывается на работоспособности всей системы.

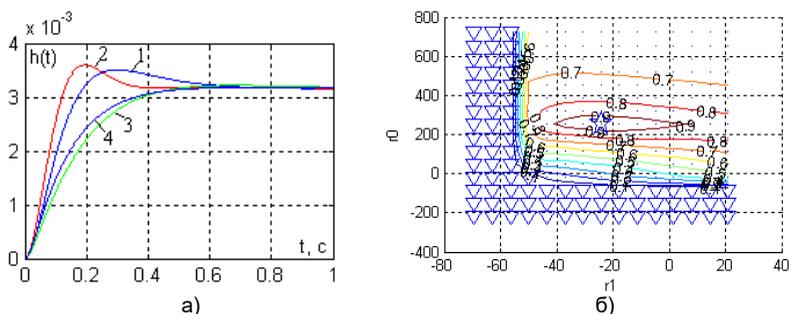


Рис. 1. Графики переходных характеристик (а) и области робастности САУ при вариации параметров полинома  $R(s)$  (б)

Анализ «областей робастности» САУ при вариации коэффициентов полинома  $R(s)$  (рис. 1, б) позволяет судить о возможности коррекции неблагоприятного параметра  $r_1$ , вплоть до  $r_1 = 7$ , при незначительном изменении качества переходного процесса САУ (система находится в области 0.9, что соответствует отклонению на 10% от эталонного значения).

Приняв  $r_1 = 4$ , полиномы регулятора будут иметь вид:

$$R(s) = 4s + 251.8; \quad C(s) = s + 54.2.$$

На графиках 3, 4 (рис. 1, а) представлены переходные характеристики для скорректированной САУ при исходных параметрах ОУ и при увеличении параметра  $b_1$  на 30%, соответственно. Их анализ показывает значительное снижение параметрической чувствительности САУ.

Таким образом, применение метода построения областей робастности относительно параметров регулятора позволяет не только выявить возможные резервы повышения робастности за счет изменения наиболее неблагоприятных значений параметров регуляторов, но и дать им точную количественную оценку при сохранении приемлемых показателей качества САУ.

#### Литература

1. **Тарарыкин С.В.**, Аполонский В.В., Терехов А.И. Исследование влияния положительных обратных связей на робастные свойства систем автоматического управления с регуляторами состояния // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2013. №3. – С. 9-16.
2. **Тарарыкин С.В.**, Тютиков В.В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2000. – 212 с.: ил.
3. **Красовский А.А.**, Проблемы физической теории управления, Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. 1990, выпуск 11, – С. 3–28.

УДК 62-50-83

В.Н. ЕГОРОВ, к.т.н., профессор,  
П. И. ГАМИДОВ, магистрант,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: egorov-vn-1957@mail.ru, parvizgamidov@mail.ru*

## **Динамические характеристики моделей силовых преобразователей для задач синтеза регуляторов**

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ динамических характеристик разных моделей силовых преобразователей для двигателя постоянного тока с целью повышения точности исследования динамики системы управления объектом.

**Ключевые слова:** управление, модель силового преобразователя, активный выпрямитель, динамические показатели.

V.N. EGOROV, Candidate of Engineering, professor,  
P.I. GAMIDOV, Master's Degree student,

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: egorov-vn-1957@mail.ru, parvizgamidov@mail.ru*

## **Dynamic characteristics of power converter models for solution of the problem of regulators synthesis**

**Abstract.** The comparative analysis of influence of power converter models for direct current motor on dynamic properties of control system is implemented.

**Key words:** control, dynamic parameters, active rectifier, power converter model.

Известно, что качество автоматизации производственных процессов определяется точностью, надёжностью, динамическими показателями и др. характеристиками элементов системы управления.

При решении задач синтеза регуляторов для управления состоянием технологических объектов силовые преобразователи (СП) для питания двигателей постоянного тока (ДПТ) часто при моделировании представляются упрощенно – либо безынерционным звеном, либо апериодическим звеном, без учёта конкретной схемы СП [1]. Для более точной оценки влияния типа и динамических характеристик силового преобразователя на характеристики регуляторов были разработаны и исследованы в пакете MATLAB динамические модели силовых преобразователей с системой управления. Это модель трёхфазного мостового управляемого выпрямителя (УВ) на одноперационных тиристорах и модель трёхфазного мостового двунаправленного выпрямителя на IGBT-транзисторах (так называемый, активный выпрямитель)

[2], причём данные модели совместимы со структурными динамическими моделями объекта управления и регуляторов.

На рис. 1 приведены переходные характеристики  $U_{\text{пит}} = f(t)$  моделей силовых преобразователей для питания ДПТ: упрощенной модели управляемого выпрямителя в виде апериодического звена, полной модели трёхфазного мостового УВ на однооперационных тиристорах и полной модели трёхфазного мостового двунаправленного выпрямителя на IGBT-транзисторах (активного выпрямителя).

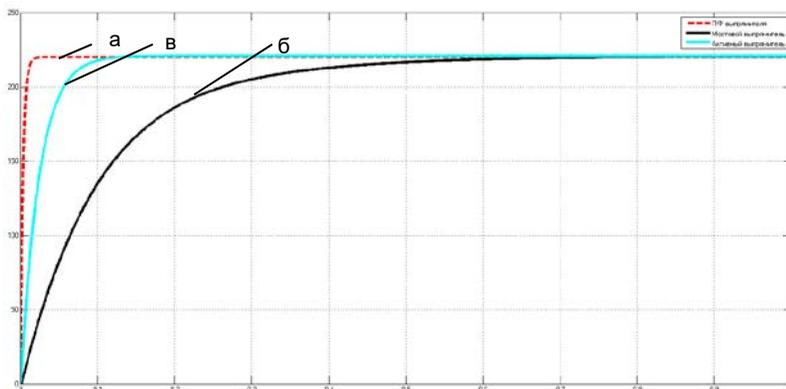


Рис. 1. Переходные характеристики  $U_{\text{пит}} = f(t)$  для  
 а – модели силового преобразователя как апериодического звена;  
 б – модели трёхфазного мостового УВ на тиристорах;  
 в – модели активного выпрямителя на IGBT-транзисторах

Полученные результаты моделирования наглядно показывают, что динамические свойства системы управления при учете динамических характеристик в полной модели СП будут существенно отличаться из-за различия в характеристиках моделей (например, кривые а и б рис.1). Видно, что если применить для питания ДПТ распространённый трёхфазный мостовой УВ на тиристорах это ухудшит динамику системы управления объектом. Отметим, что и энергетические характеристики УВ на тиристорах оставляют желать лучшего. Поэтому, в качестве СП для питания ДПТ был рассмотрен трёхфазный мостовой двунаправленный выпрямитель на IGBT-транзисторах (активный выпрямитель), разработана его модель и переходная характеристика показана на рис.1,в. Динамические показатели СП здесь значительно лучше, а энергетические характеристики на много превосходят характеристики тиристорных УВ.

Таким образом, применение подробных моделей СП при анализе и синтезе систем управления даёт более точные результаты и позволяет

выбрать силовой преобразователь с лучшими динамическими и энергетическими характеристиками.

#### Литература

1. Котов Д.Г., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Синтез линейных регуляторов для управления состоянием технологических объектов/ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2005. – 172с., ил.
2. С. Герман-Галкин. ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB–Simulink. Урок 15. Исследование однофазного активного выпрямителя. – Журнал «Силовая электроника» №4'2012, с.72-79.

УДК 621.38

В.Г. ТЕРЕХОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: vladimirtg2@yandex.ru

### Модернизация системы управления ткацкого станка

**Аннотация.** Модернизирована система управления ткацким станком, позволяющая как управлять станком, так и собирать информацию о его состоянии, времени работы и выработке.

**Ключевые слова:** ткацкий станок, контроллер, интерфейс RS485, протокол MODBUS.

V.G. TEREKHOV, Candidate of Engineering Sciences, Docent

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: vladimirtg2@yandex.ru

### Loom's control system modernisation

**Abstract.** Loom's control system was improved. Now it not only controls the loom, but also can gather information about the state of machine, time of functioning and output.

**Key words:** loom, controller, interface RS485, protocol MODBUS.

В условиях кризиса предприятия не имеют средств на закупку современного оборудования и вынуждены эксплуатировать старое. Однако требования увеличения эффективности производства заставляют руководителей таких предприятий внедрять информационные системы для оперативного анализа состояния производства. Такая задача возникла у руководства одного из текстильных предприятий нашей области. На предприятии используют порядка 500 ткацких станков тип СТБ разных годов выпуска.

Основная задача предлагаемой нами разработки – создание бюджетной информационной системы контроля ткацкого производства. На первом этапе предполагалось контролировать лишь время работы станка.

Анализ доступных серийных контроллеров основного сегмента показал не приемлемую для заказчика стоимость работ. Контроллеры с развитой периферией стоят до 30000 руб. и даже при установке одного контроллера на несколько станков реализация проекта значительно превышает бюджет. Контроллеры нижней ценовой границы не обладают требуемыми функциональными возможностями. Поэтому для решения данной задачи был разработан локальный контроллер.

Наличие локального контроллера на станке вызвало у заказчика желание решить одновременно задачи модернизации системы управления станком и расширить информационную составляющую сообщений со станка.

«Глобальные» требования заказчика при бюджетной стоимости проекта:

- удаленный сетевой доступ к информации о состоянии станка;
- безискровая система управления станком;
- вызов на станок ремонтного персонала с местного пульта с указанием до 6 причин неисправности;
- контроль количества включений/отключений станка и времени простоя;
- контроль тока двигателя;
- учет выработки ткани на станке;
- счет количества уточных нитей в выработанной ткани.

Аппаратной основой сети выбран интерфейс RS485, обеспечивающий требуемую протяженность и количество подключений. Применение протокола MODBUS позволяет использовать бесплатное программное обеспечение как основу системы опроса для базы данных состояния производства.

Анализ станочного парка предприятия показал, что используются станки с тремя типами систем управления – на основе реле, на основе герконовых реле и с микропроцессорной системой управления первого поколения. При этом в связи с недостаточной квалификацией ремонтного персонала микропроцессорный вариант «модернизирован» в релейный. Исполнительный механизм упрощен до однодвигательной схемы с трехфазным асинхронным двигателем.

Основная задача при останове станка при любой системе управления – обеспечить останов механической части в определенном положении, позволяющем проводить обслуживание. В старых станках для этого используется специальный тормозной магнит с механическим зацеплением, в новых – применяются датчик положения и управляемый привод.

Оптимально – установка на все станки датчиков положения и преобразователей частоты, но это выходит за рамки бюджета.

Преобразователь частоты так же решил бы задачу безискровой системы управления, что актуально для пожароопасного производства. Другой вариант решения этой задачи – использование бесконтактного твердотельного тиристорного пускателя (более 7000 рублей) также не проходит по стоимости. Следовательно, решить задачу полностью бесконтактного управления в условиях финансовых ограничений не удастся. Реализация логики управления на микроконтроллере при условии управления двигателем через контактный силовой пускатель не вызывает затруднений.

Так же не вызывает затруднений реализация местного пульта вызова ремонтного персонала, контроль количества включений/отключений станка и времени простоя.

Важной проблемой на данном производстве является опасность пожара при заклинивании двигателей и потере фазы питания. Для этого требуется контролировать ток двигателя. Так как в этом случаи требуется не столько абсолютное значение тока, сколько динамика изменения его во времени оговорена точность измерения не хуже 10% от номинала тока двигателя. Ток измеряется бесконтактно в двух фазах с помощью токовых трансформаторов упрощенной конструкции, обеспечивающих необходимую гальваническую развязку схемы измерения от силовой части. Для точных измерений обычно ток измеряется до 20 раз на период питающего напряжения. В данной конструкции для уменьшения нагрузки на вычислительную часть системы измерения производятся лишь два раза за период.

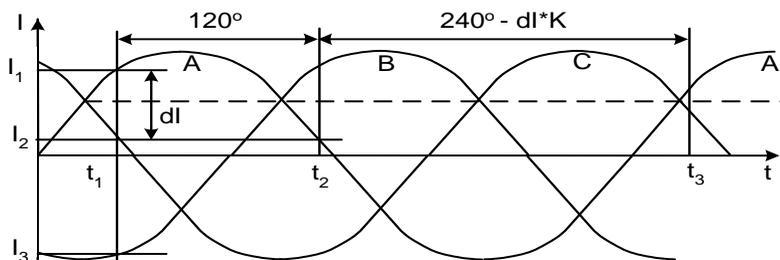


Рис. 1. Измерение тока в фазах по двум точкам за период

На рис. 1 приведена временная диаграмма, поясняющая особенности измерения тока. В идеальном случае ток в выбранной основной контролируемой фазе (условно А) измеряется в моменты  $30^\circ$  и  $150^\circ$  периода сети, то есть с разницей по фазе  $120^\circ$ . Величина тока будет равна 0.5 от максимального значения. Реально моменты измерения

могут отличаться от выбранных (точки  $t_1$  и  $t_2$ ). Если измеренные токи  $I_1$  и  $I_2$  положительны, то результат измерения определяется как среднее значение. Следующее измерение производится через  $240^0$  с коррекцией, пропорциональной разнице токов  $dI = I_1 - I_2$ .

В зависимости от фазировки второй измеряемый ток в момент времени  $t_1$  может быть или фазы С ( $\sim I_2$ ) или фазы В ( $I_3$ ) и при равенстве токов в фазах в одной из точек измерения должен совпадать с током основной фазы.

При включении первое измерение может быть в любой момент времени. Вхождение в режим нормального измерения проводятся измерениями с основным скорректированным интервалом  $120^0$  до получения подряд двух положительных значений тока.

Подсчет уточных нитей производится с использованием датчика Холла по числу ходов натяжителя нити.

Для учета выработки ткани обычно применяют датчики на основе фотоимпульсных преобразователей перемещения. Стоимость таких датчиков от 6000 рублей, что превышает бюджет разработки. Менее точно подсчет можно вести установкой датчика Холла на один из выходных валов, например на грудницу.

УДК 677: 681.062.83

В.П. АЛЕКСАНДРОВ<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник,  
В.Н. ЕГОРОВ<sup>2</sup>, к.т.н., доцент,

<sup>1</sup>АО "Ивэлектроналадка"  
153032 г. Иваново, ул. Ташкентская, д. 90  
E-mail: 89109843671@mail.ru

<sup>2</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: egorov-vn-1957@mail.ru

### **Релейно-логическое управление длительностью обработки транспортируемого в свободном состоянии текстильного материала в технологической машине**

**Аннотация.** Разработан способ стабилизации длины транспортируемого в свободном состоянии текстильного материала в технологической машине непрерывного действия. Получен патент на изобретение.

**Ключевые слова:** текстильный материал, количество, управление.

V.P. ALEKSANDROV<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, senior staff scientist,  
V.N. EGOROV<sup>2</sup>, Candidate of Engineering, docent,

<sup>1</sup>SC "IvElectroNaladka",  
153032 Ivanovo, Tashkentskay St., 90  
E-mail: 89109843671@mail.ru

<sup>2</sup>Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: egorov-vn-1957@mail.ru

## **A relay-logical control of processing duration of textile material transported in free state in technological machine**

**Abstract.** The stabilization mode of length of textile material transported in free state in continuous operation technological machine is developed. Patent for an invention is obtained.

**Key words:** textile material, quantity, control.

Задача автоматизации управления длительностью обработки транспортируемого в свободном состоянии текстильного материала в технологической машине непрерывного действия на практике решается стабилизацией запаса (длины) текстильного материала в зоне обработки.

Недостатками известных способов управления длиной текстильного материала в технологической машине являются либо низкая точность стабилизации длины текстильного материала, либо отсутствие самой возможности регулирования длины текстильного материала в технологической машине.

В [1] предложен способ релейно-логического управления длиной текстильного материала в технологической машине, который заключается в стабилизации в зоне обработки заданного количества меток, нанесённых на текстильный материал.

На рис.1 приведена блок-схема устройства, реализующего предлагаемый способ релейно-логического управления длиной текстильного материала в технологической машине.

Текстильный материал 1 обрабатывается и транспортируется в свободном состоянии в U-образной технологической машине 2. Транспортирование текстильного материала 1 обеспечивается входным рабочим органом 3 и выходным рабочим органом 4. На текстильный материал 1 нанесены метки 5, контролируемые входным датчиком меток 6 и выходным датчиком меток 7.

К входному рабочему органу 3 подключены соединённые последовательно блок управления 8 и привод 9, а к выходному рабочему органу 4 подсоединены включённые последовательно блок управления 10 и привод 11. Первый вход блока управления 8 и вход блока управления 10 объединены и связаны с выходом задающего блока 12. Выходы входного датчика меток 6 и выходного датчика меток 7 подключены к

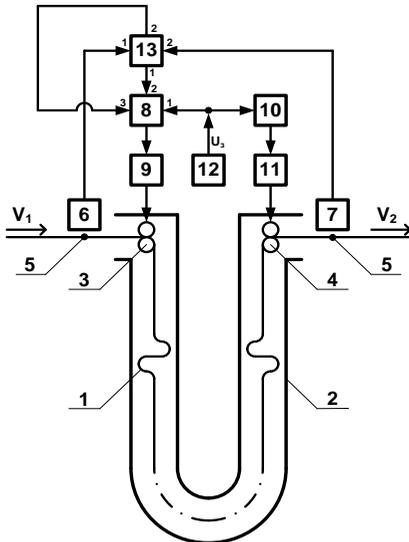


Рис.1

соответствующим входам релейно-логического блока коррекции 13, подсоединённого первым выходом ко второму входу блока управления 8, а второй выход релейно-логического блока коррекции 13 соединён с третьим входом блока управления 8.

Способ реализуется следующим образом.

В соответствии с сигналом задания  $U_3$  задающего блока 12 блоки управления 8 и 10 устанавливают линейные скорости текстильного материала 1 на входе  $V_1$  и выходе  $V_2$  технологической машины 2 согласно соотношения

$$V_1 = V_2 \cdot (1 + \varepsilon), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – относительное изменение длины (усадка) обрабатываемого текстильного материала 1.

Поскольку  $\varepsilon$  – величина случайная, из выражения (1) получаем условие целесообразной настройки соотношения линейных скоростей:

$$V_1 = V_2 \cdot (1 + m_\varepsilon), \quad (2)$$

где  $m_\varepsilon$  – математическое ожидание относительного изменения длины (усадки) обрабатываемого текстильного материала 1.

Т.к.  $\varepsilon \neq m_\varepsilon$ , реальное соотношение линейных скоростей по формуле (1) может отличаться от условия настройки соотношения линейных скоростей по формуле (2). Учитывая различия в проскальзывании текстильного материала 1 во входном рабочем органе 3 и в выходном рабочем органе 4, всё это ведёт к значительному отклонению от заданного значения длины текстильного материала 1 в технологической машине 2. Выход отклонения за допустимые границы может вызвать аварийный останов технологического процесса и ухудшить качество обрабатываемого текстильного материала 2.

Для стабилизации длины текстильного материала 1 в технологической машине 2 релейно-логический блок коррекции 13 воспринимает импульсы, формируемые входным датчиком меток 6 и выходным датчиком меток 7. В качестве естественных меток 5 могут, например, использоваться швы, т.е. утолщения материала, образующиеся при сшивании отдельных кусков текстильного материала 1 в непрерывное полотно, либо швы, выполненные металлизированными нитями. При чередовании импульсов от входного датчика меток 6 и выходного датчика меток 7

сигналы на выходах релейно-логического блока коррекции 13 равны нулю и линейная скорость  $V_1$  текстильного материала 1 на входе в технологическую машину 2 равна заданной согласно формуле (2).

В случае поступления двух (или более) импульсов подряд от входного датчика меток 6 на интервале времени между регистрацией смежных импульсов от выходного датчика меток 7 на первом выходе релейно-логического блока коррекции 13 формируется сигнал о необходимости снижения линейной скорости  $V_1$  текстильного материала 1 на входе в технологическую машину 2. При поступлении двух (или более) импульсов подряд от выходного датчика меток 7 в интервале времени между регистрацией смежных импульсов от входного датчика меток 6 на втором выходе релейно-логического блока коррекции 13 формируется сигнал, свидетельствующий о необходимости повышения линейной скорости  $V_1$  текстильного материала 1 на входе в технологическую машину 2.

Блок управления 8 производит необходимую коррекцию линейной скорости  $V_1$  текстильного материала 1 на входе в технологическую машину 2. Сформированный релейно-логическим блоком коррекции 13 сигнал сохраняется до тех пор, пока от смежного датчика меток не поступят два импульса подряд в интервале времени между регистрацией смежных импульсов от датчика, чья пара импульсов вызвала коррекцию линейной скорости  $V_1$  текстильного материала 1 на входе в технологическую машину 2. Это свидетельствует о восстановлении заданной длины текстильного материала 1 в технологической машине 2.

Таким образом, реализация предложенного способа позволяет надёжно осуществлять управление длиной, а, следовательно, и длительностью обработки текстильного материала в технологической машине непрерывного действия.

### Литература

1. Патент на изобретение РФ № 2552373. Александров В.П., Егоров В.Н. В65Н23/02. Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина – Заявл. 18.11.2013, опубл. 10.06.15, 7 с., ил.

УДК 677: 681.062.83

В.П. АЛЕКСАНДРОВ<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник,  
В.Н. ЕГОРОВ<sup>2</sup>, к.т.н., доцент,

<sup>1</sup>АО "Ивэлектроналадка"  
153032 г. Иваново, ул. Ташкентская, д. 90  
*E-mail: 89109843671@mail.ru*

<sup>2</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: egorov-vn-1957@mail.ru*

### **Адаптивное управление уровнем транспортируемого в свободном состоянии текстильного материала в технологической машине**

**Аннотация.** Разработан способ управления уровнем транспортируемого в свободном состоянии текстильного материала в технологической машине непрерывного действия. Получен патент на изобретение.

**Ключевые слова:** текстильный материал, уровень, управление.

V.P. ALEKSANDROV<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, senior staff scientist,  
V.N. EGOROV<sup>2</sup>, Candidate of Engineering, docent,

<sup>1</sup>SC "IvElectroNaladka"  
153032 Ivanovo, Tashkentskay St., 90  
*E-mail: 89109843671@mail.ru*

<sup>2</sup>Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: egorov-vn-1957@mail.ru*

### **An adaptive control of level of textile material transported in free state in technological machine**

**Abstract.** The control mode of level of textile material transported in free state in continuous operation technological machine is developed. Patent for an invention is obtained.

**Key words:** textile material, level, control.

Задача обеспечения необходимой длительности пребывания в зоне обработки текстильного материала (ТМ), транспортируемого в свободном состоянии, решается при заданной линейной скорости ТМ поддержанием его количества (длины) в технологической машине непрерывного действия (ТМНД).

Наиболее простым и надёжным техническим решением для стабилизации длины ТМ в ТМНД является релейная система управления уровнем ТМ (РСУУТМ) [1], релейный блок (РБ) которой, как правило, имеет характеристику двухпозиционного реле с гистерезисом. Для подобных систем характерен режим автоколебаний, причём наличие

внешних и/или параметрических возмущающих воздействий приводит к несимметрии автоколебаний в РСУУТМ, а в дальнейшем - к её неработоспособности.

Как установлено в [1], предложенное в [2] устройство для косвенной компенсации возмущающих воздействий не обеспечивает восстановления симметрии автоколебаний в РСУУТМ вследствие принципиальной ошибки в функциональной схеме устройства, а результаты моделирования [3] устройства не в полной мере соответствуют его функциональной схеме.

В [4] предложен способ непосредственного контроля и компенсации несимметрии автоколебаний в РСУУТМ, который обеспечивает адаптивное управление уровнем ТМ в ТМНД.

На рис.1 приведена блок-схема устройства, реализующего предлагаемый способ.

Принятые условные обозначения: 1 - ТМ, 2 - ТМНД, 3- входной рабочий орган, 5 - блок управления, 6 - привод, 7-блок управления, 8 - привод, 9- задающий блок, 10 - верхний датчик уровня, 11 - нижний датчик уровня, 12 - РБ, 13 – блок коррекции.

В рабочем режиме в зависимости от сигнала задания  $U_3$  задающего блока 9 блоки управления 5 и 7, воздействуя соответственно на приводы 6 и 8, устанавливают линейные скорости ТМ1 на входе  $V_1$  и выходе  $V_2$  ТМНД2, причём

$$V_1 = V_2 \cdot (1 + \varepsilon) \pm \Delta V, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  - относительное изменение длины (усадка) обрабатываемого ТМ1,  $\Delta V$  – регулирующее воздействие РБ12 (м/с), определяющееся выходным сигналом  $\pm \Delta U$  РБ12.

Для случайной величины  $\varepsilon$  условие целесообразной настройки соотношения линейных скоростей ТМ1:

$$V_1 = V_2 \cdot (1 + m_\varepsilon) \pm \Delta V, \quad (2)$$

где  $m_\varepsilon$ , - математическое ожидание усадки обрабатываемого ТМ1.

Т.к.  $\varepsilon \neq m_\varepsilon$ , реальное соотношение линейных скоростей  $V_1$  и  $V_2$  по формуле (1) существенно отличается от условия настройки формуле

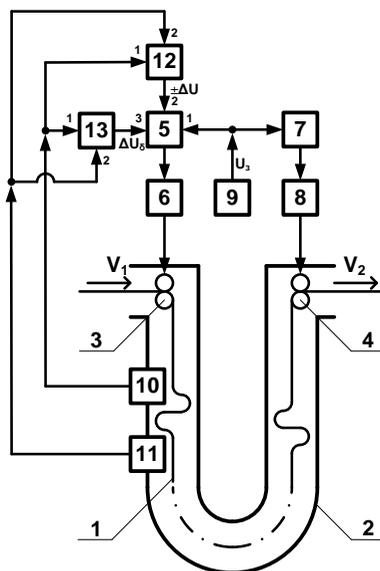


Рис.1

(2), а это с учётом различия в проскальзывании ТМ1 во входном рабочем органе 3 и в выходном рабочем органе 4, износа рабочих органов 3 и 4, смены артикула ТМ1 и т.д. ведёт к несимметрии автоколебаний в устройстве и может вызвать аварийное отклонение уровня ТМ1 в ТМНД2 за пределы, контролируемые верхним датчиком уровня 10 и нижним датчиком уровня 11.

Уровень  $H$  материала ТМ1 в ТМНД2 изменяется в соответствии с зависимостью

$$H = H_0 + T^{-1} \cdot \int \Delta V \cdot dt, \quad (3)$$

где  $H_0$  - начальное значение уровня ТМ1,  $T$  – постоянная интегрирования, определяемая артикулом ТМ1, или

$$\Delta H = T^{-1} \cdot \Delta V \cdot t, \quad (4)$$

где  $\Delta H$  - расстояние между верхним 10 и нижним 11 датчиками уровня, м.

Наличие внешних и/или параметрических возмущающих воздействий приводит к эквивалентному отклонению  $\delta V$  от заданного значения линейной скорости  $V_1$  ТМ1 на входе в ТМНД2.

Из соотношения (4) можно определить промежуток времени  $t_{\uparrow}$  нарастания уровня ТМ1 в ТМНД2 от нижнего датчика уровня 11 до верхнего датчика уровня 10 и промежуток времени  $t_{\downarrow}$  убывания уровня ТМ1 в ТМНД2 от верхнего датчика уровня 10 до нижнего датчика уровня 11:

$$t_{\uparrow} = \Delta H \cdot T \cdot (\Delta V - \delta V)^{-1}, \quad (5)$$

$$t_{\downarrow} = \Delta H \cdot T \cdot (\Delta V + \delta V)^{-1}. \quad (6)$$

Решая совместно выражения (5) и (6) относительно  $\delta V$ , находим

$$\delta V = \{T^2 \cdot (\Delta H)^2 + (t_{\uparrow} - t_{\downarrow})^2 \cdot (\Delta V)^2\}^{-1/2} - T \cdot \Delta H / (t_{\uparrow} - t_{\downarrow}). \quad (7)$$

Блок коррекции 13 на основании измерения промежутков времени  $t_{\uparrow}$  и  $t_{\downarrow}$  вычисляет по формуле (7) величину  $\delta V$  и формирует сигнал  $\Delta U_{\delta}$ , обеспечивающий изменение линейной скорости  $V_1$  ТМ1 на величину  $-\delta V$  с целью компенсации возмущающих воздействий.

Если  $t_{\uparrow} > t_{\downarrow}$ ,  $\Delta U_{\delta} > 0$  и  $V_1$  возрастает на  $\delta V$ , а если  $t_{\uparrow} < t_{\downarrow}$ ,  $\Delta U_{\delta} < 0$  и  $V_1$  убывает на  $-\delta V$ .

Постоянный контроль величин  $t_{\uparrow}$  и  $t_{\downarrow}$  позволяет РСУУТМ практически с предельным быстродействием (за 1 цикл изменения уровня ТМ1 в ТМНД2) и с высокой точностью восстановить симметрию автоколебаний в РСУУТМ, адаптируясь к изменению внешних условий, смене артикула ТМ1, износу рабочих органов 3 и 4 и т.п.

Таким образом, реализация предложенного способа позволяет с высоким быстродействием надёжно осуществлять адаптивное релейное управление уровнем текстильного материала в технологической машине непрерывного действия с учётом внешних или/и параметрических возмущений.

### Литература

1. **Александров В.П., Кулагин С.М.** Анализ эффективности косвенной коррекции несимметрии автоколебаний в релейной системе управления уровнем текстильного материала в технологической машине // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, №1. С. 78...80.
2. Патент на изобретение РФ № 2540571. Устройство стабилизации уровня ткани в технологической машине / **Глазунов В.Ф., Филичев В.Т., Вилков П.В.** В65Н51/20. Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина. – Заявл. 19.07.2013, опубл. 10.02.2015– 7 с., ил.
3. **Филичев В.Т., Вилков П.В.** Моделирование системы стабилизации уровня ткани в технологической машине. Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения), 29-31 мая. III том. Электротехника. - Иваново. Изд. ИГЭУ. 2013, с. 51-53.
4. Патент на изобретение РФ № 2552370. Способ управления уровнем транспортируемого в свободном состоянии текстильного материала в технологической машине непрерывного действия / **Александров В.П., Егоров В.Н.**, В65Н23/00. Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Заявл. 18.11.2013, опубл. 10.06.2015– 7 с., ил.

УДК 621.38

С.А. КАПУСТИН, доцент, Е.Ю. КУРЫЛИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
*E-mail: kapustin@eims.ispu.ru*

### Использование сотового телефона в канале охранной сигнализации

**Аннотация.** Предложен вариант использования сотового телефона с кнопочным набором для установления канала связи с автономными системами охраны с предоставлением услуг передачи сообщений о срабатывании системы охраны.

**Ключевые слова:** охранная система, модуль согласования, счетчик, декодер.

S.A. KAPUSTIN, docent, E.Yu. KURYILIN, student  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.  
*E-mail: kapustin@eims.ispu.ru*

### The using of mobile phone in burglarproof alarm channel

**Abstract.** A variant of use the mobile phone with the buttons of the set is the proposal to establish a communication channel with autonomous security systems with provision of services for transmit message about the operation of the security system.

**Keywords:** security system, index of cooperation, counter, decoder.

Тенденция развития средств современной электроники направлена на то, чтобы максимально удовлетворять запросы потребителей, а точнее, пользователей электронной продукции. Вследствие этого простые электронные устройства и соответственно дешевые быстро с рынка вытесняются более "навороченными" и, следовательно, более дорогими. Приобретая современные устройства, мы вполне работоспособные, но как бы морально устаревшие, либо убираем в кладовки, либо просто выбрасываем. В полной мере эта проблема касается кнопочных сотовых телефонов, на смену которым пришли смартфоны и i-фоны с touch-экранами.

Для целей охраны жилища, транспортных средств и даже личных вещей на рынке представлено огромное количество всевозможных охранных систем. Большинство из них при нарушении режима охраны работают на звукоизвещатель, то есть на сирену. Цена таких систем, при достаточной надежности, невелика и составляет 100...200 долларов. Если же охранную систему необходимо контролировать на расстоянии, то её цена возрастает в разы. Для дистанционного контроля состояния охранной системы, установленной либо в пустующей даче, либо в автомобиле на стоянке, предлагается использовать простой кнопочный сотовый телефон с небольшим модулем согласования. Этот модуль получает информацию от штатной охранной системы и управляет мобильным телефоном, который передаёт звуковой сигнал на телефон пользователя. Провести доработку охранной системы с выходом на сирену для дистанционной связи с абонентом посредством кнопочного мобильного телефона вполне по силам начинающему радиолюбителю. Для большинства кнопочных сотовых телефонов последовательность действий и выполняемые операции в телефоне для связи с определенным корреспондентом следующие:

1. нажать на 2...3 секунды кнопку **NO**, этим действием включится аппарат;
2. выдержать паузу 8...12 с. для инициализации программного обеспечения аппарата и его вхождения в сеть сотовой связи;
3. нажать и отпустить кнопку **YES** для извлечения из памяти последнего набранного номера;
4. нажать и отпустить кнопку **YES** ещё раз, чем осуществляется вызов нужного корреспондента и при ответе корреспондента создаётся канал связи для передачи звукового сообщения.

Чтобы выполнить все манипуляции с телефоном в автоматическом режиме, необходимо построить устройство согласования, которое будет "управлять" всего двумя кнопками в телефоне – **NO** и **YES** по временному алгоритму, запускаемому по стартовому сигналу от охранной системы. Алгоритм работы модуля согласования охранной системы с мобильным телефоном представлен на рис. 1.

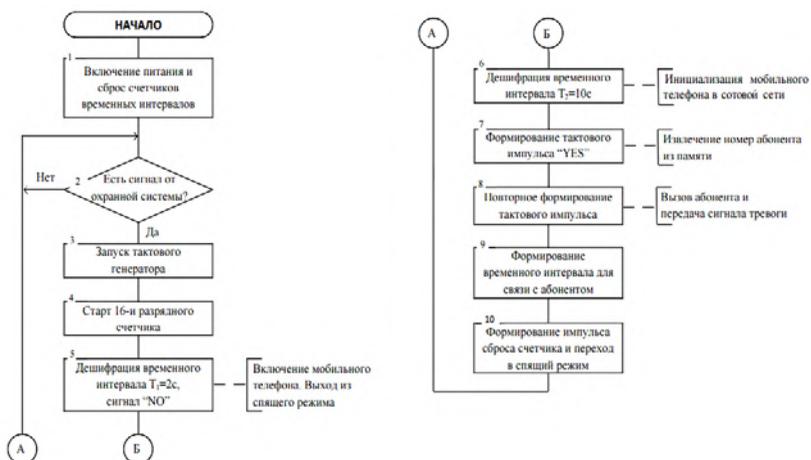


Рис. 1. Схема алгоритма работы модуля согласования

Схема электрическая функциональная модуля согласования представлена на рис. 2.

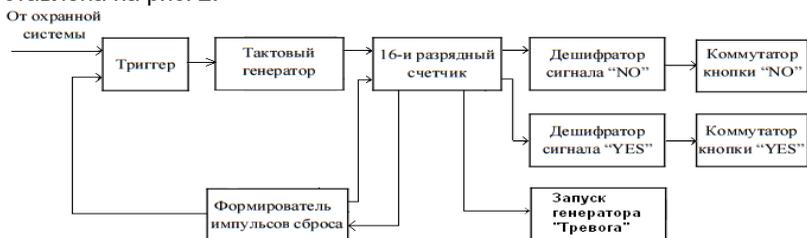


Рис.2. Модуль согласования, схема электрическая функциональная

Основой модуля является многоразрядный асинхронный двоичный счётчик, снимая сигналы с определённых выходов которого, дешифраторами формируются временные интервалы, воздействующие на ключи, управляющие кнопками YES и NO. Клавиатура у любого телефона представляет собой матрицу нормально разомкнутых контактов и, нажимая на любую кнопку, происходит простое электрическое замыкание контакта. Управлять кнопками, т.е. замыкать контакты YES и NO можно либо используя любые виды маломощных реле, управляемые ключами с выходов дешифраторов, либо используя КМОП ключи, управляемые теми же дешифраторами. Доработка телефона будет заключаться в том, что к его контактам YES и NO необходимо подключиться внешним монтажом. Использование реле в качестве коммутатора вероятно будет более предпочтительным, так как обеспечится гальваническая развязка охранной системы и модуля согласования с

телефоном. Схемотехнически модуль согласования может быть выполнен на КМОП компонентах, в дежурном режиме он будет потреблять 5...10 мкА и поэтому для его питания можно использовать любые солевые или щелочные элементы питания. В случае дозвона абоненту по факту срабатывания системы охраны, пользователь получит информацию о срабатывании системы по высветившемуся номеру телефона охраны. Для звукового подтверждения срабатывания охраны, микрофон телефона может передать звук тревожной сирены или любой тональный сигнал, сформированный отдельным генератором в составе модуля согласования. Запуск этого генератора также осуществляется сигналом от охранной системы и оканчивается общим сбросом. Телефон, находящийся в выключенном состоянии, в среднем потребляет не более 100 мкА, поэтому надёжность обеспечения тревожной связи на 5...6 месяцев будет гарантирована.

#### Литература

1. Кадино Э. Электронные системы охраны: Пер. с фр. – М.: ДМК Пресс, 2001.- 256 с.: ил. (В помощь радиолюбителю).

УДК 621.38

С.А. КАПУСТИН, доцент,  
И.А. ТИХОМИРОВА, старший преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: kapustin@eims.ispu.ru

### **Разработка дополнительного программного и методического обеспечения для согласования комплектных лабораторных стендов «СЭ-ВСАП-ПО» с персональным компьютером**

**Аннотация.** Разработано дополнительное методическое обеспечение для более эффективного проведения лабораторных исследований различных функциональных узлов силовой электроники.

**Ключевые слова:** силовая электроника, многолучевой осциллограф.

S.A. KAPUSTIN, docent  
I. A. TIKHOMIROVA, senior Teacher  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.  
E-mail: kapustin@eims.ispu.ru

## **Development of additional software and methodological support for the coordination of complete laboratory stands "СЭ-ВСАП-ПО" with a personal computer**

**Abstract.** Additional methodological support was developed for more efficient conducting of laboratory studies of various functional units of power electronics.

**Key words:** power electronics, multipath oscilloscope.

Комплект типового учебно-лабораторного оборудования «СЭ-ВСАП-ПО» предназначен для проведения лабораторно-практических занятий по дисциплине «Силовая электроника». Исследуемые в лабораторных работах функциональные узлы силовой электроники являются сложными для понимания их работы устройствами, в особенности при описательном «виртуальном» восприятии. Учитывая, что большинство электрических процессов, происходящих «внутри» замкнутой электрической схемы, являются взаимосвязанными, визуальное отображение реальной картины взаимовлияния одних электрических параметров в схеме на другие в едином масштабе времени, намного упрощает понимание принципа работы исследуемого функционального устройства.

Включение в состав оборудования комплекса персонального компьютера призвано обеспечить более эффективное и комплексное выполнение фиксации параметров исследуемых схем, их обработку по определенным алгоритмам и визуальное отображение в виде графиков, гистограмм и всевозможных временных зависимостей на экране виртуального многоканального осциллографа.

Связь компьютера с оборудованием работы осуществляется по USB интерфейсу посредством специального модуля «Коннектор с платой ввода-вывода "National Instruments NIUSB6221"» (рис. 1).

Все электрические сигналы, которые требуется контролировать в ходе выполнения лабораторной работы, внешним монтажом заводятся на определенные входы модуля коннектора. Для этого на панели коннектора выделены зоны для сигналов разного вида:

- аналоговых;
- цифровых;
- дифференциальных.

Часть входов (8 шт.) могут программироваться пользователем. Аналоговые входы объединяются по общей шине. Входные цифровые сигналы должны соответствовать уровням ТТЛ. Все входные сигналы модуля коннектора мультиплексируются, выполняется аналого-цифровое преобразование для аналоговых сигналов и стандартизация

цифровых и через буферные схемы посредством USB интерфейса поступают в компьютер для их обработки программой «MultiTool v0.1».

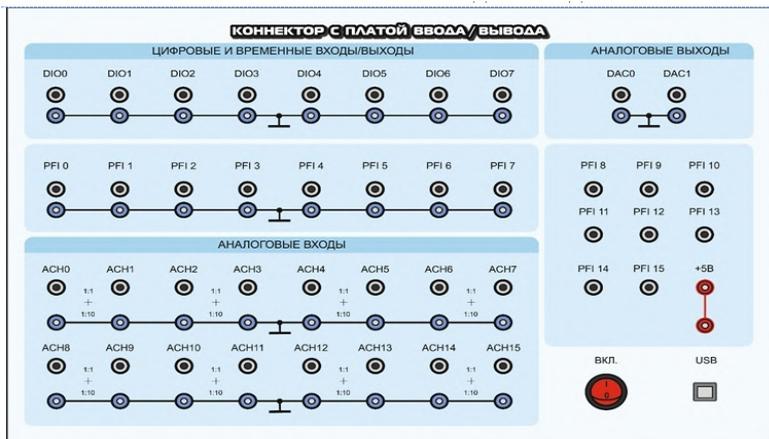


Рис. 1. Лицевая панель модуля «коннектор»

Программа «MultiTool v0.1» является виртуальным аналогом реального прибора и обладает широкими функциональными возможностями. Программа предназначена для регистрации и отображения различных аналоговых сигналов в удобной для пользователя форме. Внешний вид стартового окна программы показан на рис. 2.

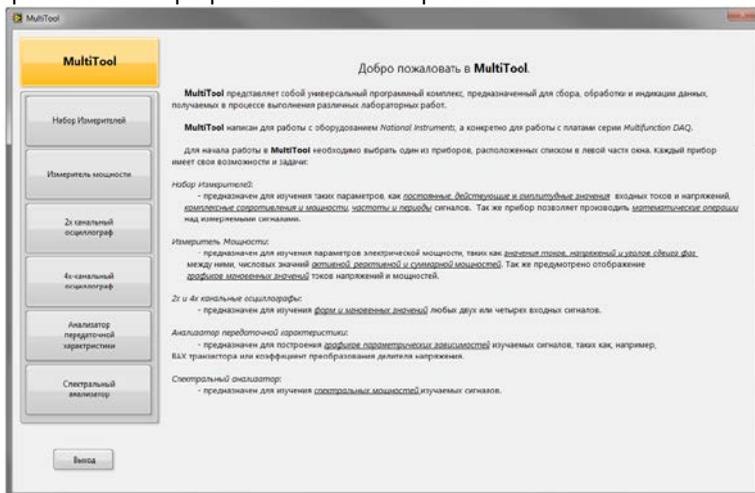


Рис. 2. Стартовое окно программы «MultiTool v0.1»

Применительно к «Силовой электронике» наиболее ценными и функционально значимыми приборами в комплексе являются двух и четырехканальный осциллографы, позволяющие в едином масштабе времени синхронно отслеживать взаимовлияние сигналов в разных точках исследуемых схем. В качестве примера представлена 3-х фазная нулевая схема управляемого выпрямителя на тиристорах, работающая на активно-индуктивную нагрузку, рис. 3.

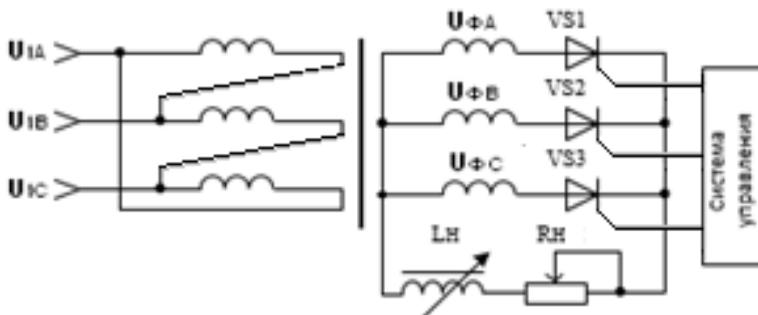
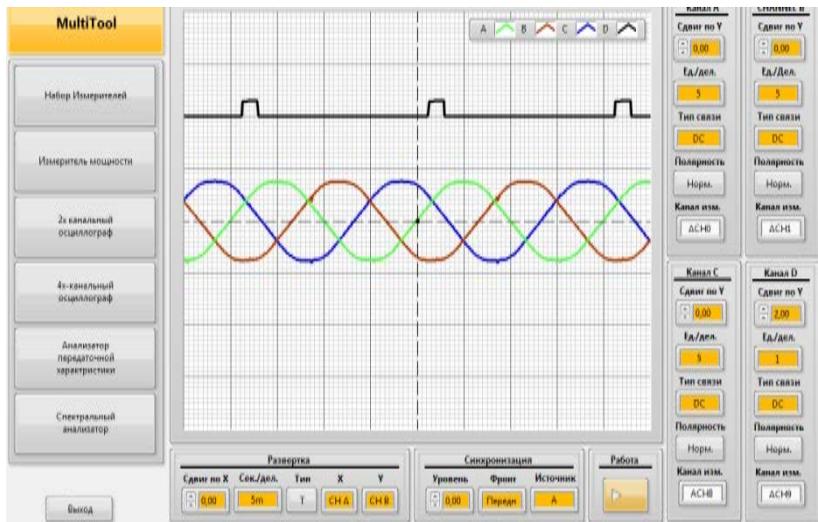


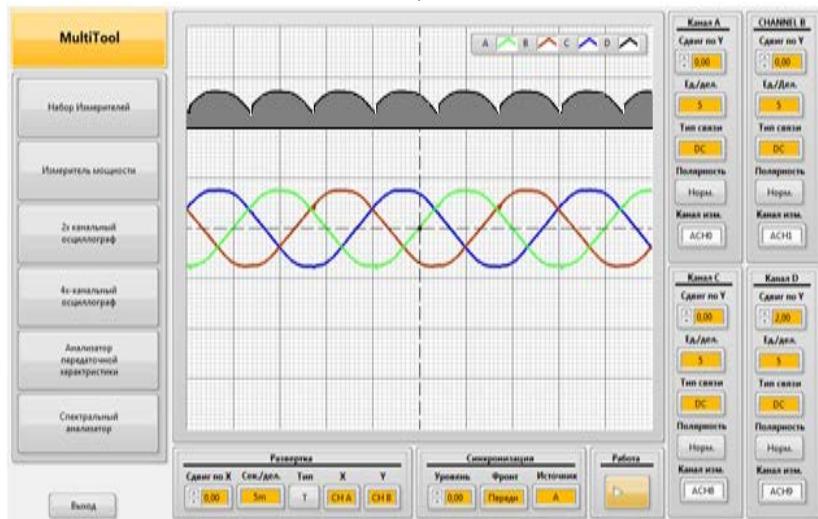
Рис. 3. Трехфазный нулевой управляемый выпрямитель

В работе исследуется влияние момента открытия тиристорov (угла управления  $\alpha$ ) на форму и значение напряжения на нагрузке, оценивается форма управляющих импульсов, подаваемых на управляющие электроды тиристорov, и в какой момент происходит открытие тиристорov. При правильном и рациональном заполнении всех служебных полей управления каналами и разверткой осциллографа, временная развёртка исследуемых сигналов представляется весьма наглядной. На рисунках 4 ÷ 5 представлены сканы форм исследуемых сигналов с экрана 4-х канального осциллографа.

Сравнительный анализ временных диаграмм для четырёх одновременно отображаемых исследуемых сигналов позволяет наглядно доказать их взаимовлияние, выявить закономерности «переключательных» параметров силовых ключей (тиристорov или транзисторov), оценить качественные показатели работы силового модуля по форме его выходного сигнала.

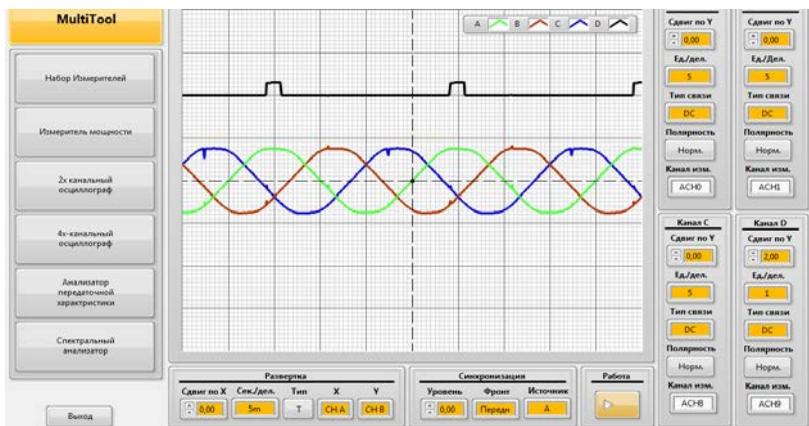


а)

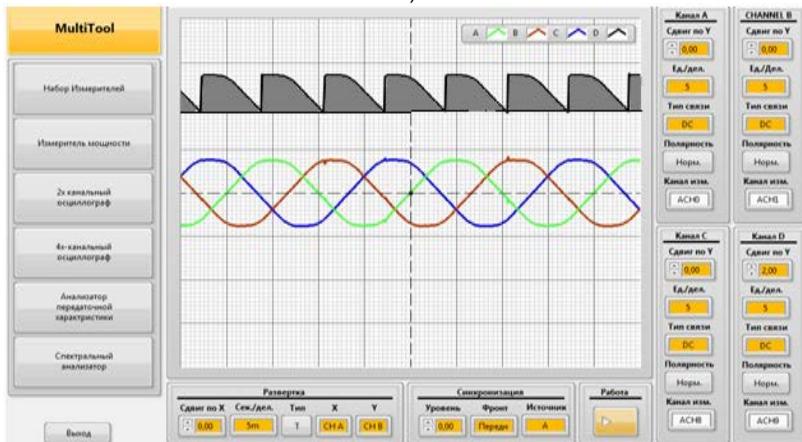


б)

Рис. 4. 4-х канальный осциллограф: а-диаграмма фазных напряжений и диаграмма управляющих импульсов при  $\alpha=10^\circ$ ; б- диаграмма фазных напряжений и диаграмма напряжения на нагрузке при  $\alpha=10^\circ$



а)



б)

Рис. 5. 4-х каналный осциллограф: а-диаграмма фазных напряжений и диаграмма управляющих импульсов при  $\alpha = 60^\circ$ ; б - диаграмма фазных напряжений и диаграмма напряжения на нагрузке при  $\alpha=60^\circ$

### Литература

1. **Карпеш, М.А.** Силовая электроника: руководство по выполнению базовых экспериментов. СЭ.001 РБЭ (911) / М.А. Карпеш, И.Л. Красногорцев, П.Н. Сенигов. – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2003. – 172 с.
2. **Сенигов, П.Н.** Силовая электроника. – Автономные преобразователи: руководство по выполнению базовых экспериментов. СЭА.001 РБЭ (911.1) / П.Н. Сенигов, М.А. Карпеш. – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2006. – 312 с.

УДК 625.083

А.А. АНИСИМОВ, д.т.н., доцент,  
И.А. МОШКИН, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, дом 34  
*E-mail: anis@eims.ispu.ru*

## **Автоматическая настройка регуляторов с наблюдателями состояния с использованием искусственной нейронной сети**

**Аннотация.** Рассматривается метод настройки регуляторов с наблюдателями состояния, основанный на идентификации объекта при помощи радиальной нейронной сети с последующим расчетом параметров регулятора методом модального управления. Предлагаемый подход позволяет существенно сократить длительность и повысить качество настройки системы управления.

**Ключевые слова:** регулятор состояния, автоматическая настройка, радиальная нейронная сеть, обучение нейронной сети, электромеханическая система.

A.A. ANISIMOV, Doctor of Engineering, Associate Professor,  
I.A. MOSHKIN, student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34  
*E-mail: anis@eims.ispu.ru*

## **Automatic tuning of the state regulators and observers with help of artificial neural network**

**Abstract.** The article deals with the problem of automatic tuning of the state regulators. The suggested method of tuning is based on the identification of control object with help of the radial neural network and the following calculation of regulator parameters by method of modal control. This approach allows significantly reduce an amount of time, needed for tuning of control system.

**Key words:** state regulator, automatic tuning, radial neural network, neural network training, electromechanical system.

Системы автоматического управления, построенные на основе регуляторов с наблюдателями состояния (РНС), позволяют обеспечить высокое качество управления сложными объектами при невозможности измерения всего вектора координат [1]. Вместе с тем, для реализации потенциальных возможностей РНС необходимо применение средств автоматической настройки, что обусловлено параметрической неопределенностью реальных объектов управления.

Задача настройки систем управления с РНС осложняется большим числом переменных параметров подобных устройств, а также взаимным влиянием этих параметров. В этих условиях известные методы настройки, основанные на алгоритмах численной оптимизации, оказываются малоэффективными. В задачах автоматической настройки

систем управления ранее было предложено использовать искусственные нейронные сети (ИНС), позволяющие выполнять коррекцию параметров регулятора по результатам единственного эксперимента [1, 2].

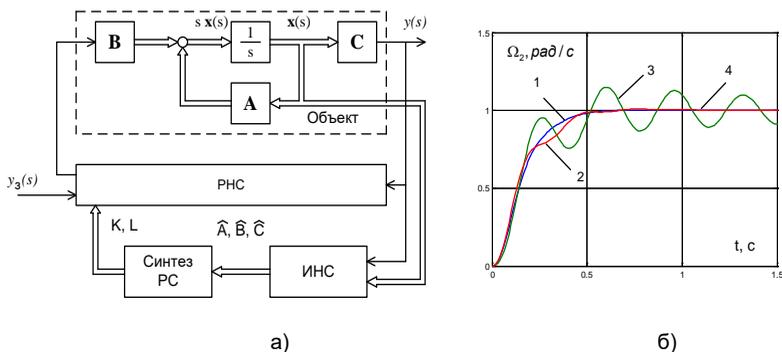


Рис. 1. Структурная схема (а) и переходные характеристики (б) системы автоматической настройки ПНС

Для решения задачи автоматической настройки систем управления с ПНС предлагается использовать гибридный метод, основанный на идентификации параметров объекта при помощи радиальной ИНС с последующим расчетом параметров регулятора методом модального управления. Структура системы с блоком настройки приведена на рис. 1 а, где  $s$  – переменная Лапласа;  $y_3$ ,  $y$  – входной и выходной сигналы системы;  $x$  – вектор состояния; **A**, **B** и **C** – матрицы состояния, входа, выхода объекта.

В процессе настройки на вход системы управления подается тестовый сигнал, затем на основе анализа переходных характеристик для одной или нескольких координат состояния ИНС дает оценки переменных параметров объекта. На основе полученных данных, а также априорной информации о структуре и параметрах объекта формируются матрицы наблюдателя состояния. Расчет коэффициентов обратных связей ПНС для полученных матриц наблюдателя осуществляется методом модального управления на основе заданных характеристических полиномов контура управления  $D(s)$  контура подстройки  $D^*(s)$ .

Для решения задачи идентификации параметров объекта по переходным характеристикам системы управления целесообразно использовать радиальную ИНС, позволяющую эффективно классифицировать получаемые данные [2, 3]. Подобные ИНС состоят из двух слоев, причем нейроны 1-го слоя реализуют радиальные функции Гаусса, а нейроны 2-го слоя вычисляют взвешенную сумму входных сигналов. Для обучения радиальной ИНС используется алгоритм *newrb*, входя-

щий в состав комплекса MatLab, позволяющий оптимизировать количество нейронов первого слоя сети.

Исследование предлагаемого метода автоматической настройки проводилось на примере типичной двухмассовой электромеханической системы с РНС [5]. Векторно-матричная модель данного объекта в координатах состояния  $\mathbf{x} = [\Omega_1 \quad M_y \quad \Omega_2]$  имеет вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -K_D/J_1 & -1/J_1 & K_D/J_1 \\ C_{12} & 0 & -C_{12} \\ K_D/J_2 & 1/J_2 & -K_D/J_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} K_M/J_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 1],$$

где  $\Omega_1, \Omega_2$  – скорости 1-й и 2-й масс,  $M_y$  – упругий момент;  $J_1 = 0,015$  и  $J_2 = 0,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  – моменты инерции 1-й и 2-й масс;  $C_{12} = 0,65 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и  $K_D = 0,15 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  – коэффициенты жесткости и трения механической передачи;  $K_M = 1,12 \text{ Н}\cdot\text{м}$  – коэффициент передачи замкнутого контура момента.

По матричной модели для номинальных параметров объекта методом модального управления был синтезирован РНС с наблюдателем состояний в канонической форме управляемости на основе желаемых характеристических полиномов Ньютона при среднегеометрическом корне  $\Omega_0 = 10,5$  с в контуре управления и  $\Omega_H = 30$  с в контуре подстройки.

С учетом априорной информации об объекте, в качестве переменных параметров при обучении ИНС были выбраны моменты инерции  $J_1$  и  $J_2$ , а также коэффициенты  $C_{12}$  и  $K_D$ . На входы ИНС подавались значения переходных характеристик для наиболее информативных координат состояния объекта ( $M_y$  и  $\Omega_2$ ). Обучающая выборка ИНС включала в себя 300 переходных характеристик, диапазон вариации параметров объекта управления  $\pm 50\%$  от номинальных значений.

Предлагаемый нейросетевой метод настройки был реализован в виде программы на языке комплекса MatLab. Результаты моделирования процессов настройки системы управления с РНС приведены на рис. 1 б, где кривая 1 соответствует расчетным параметрам, кривая 2 – отклонению  $K_D = 0,035 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ , кривая 3 – отклонению  $J_2 = 0,75 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  от номинальных значений. После идентификации параметров объекта и расчета коэффициентов РНС переходная характеристика (кривая 4) практически совпадает с эталонной.

Таким образом, предложенный метод, основанный на идентификации параметров объекта при помощи радиальной ИНС, позволяет существенно сократить длительность настройки системы управления с РНС.

### Литература

1. **Анисимов А.А.**, Тарарыкин С.В. Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 296 с.
2. **Методы** классической и современной теории автоматического управления. Т.3: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 748 с.
3. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
4. **Башарин А.В.**, Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учеб. пособие. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

УДК 677.051.479

И.В. СОЛОВЬЕВ<sup>1</sup>, магистрант  
А.И. ТЕРЕХОВ<sup>2</sup>, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: ilyasoloviyov@mail.ru<sup>1</sup>, terehov@eims.ispu.ru<sup>2</sup>*

### Регулятор с переменной структурой линейной плотности текстильной ленты

**Аннотация.** Предложен вариант построения регулятора линейной плотности текстильной ленты, основанный на использовании сложного нелинейного элемента, что позволяет придать устройству такие положительные качества, как высокое быстродействие при сохранении достаточной точности, приведены результаты компьютерного моделирования сложного нелинейного элемента регулятора.

**Ключевые слова:** вытяжной прибор, линейная плотность, регулятор, нелинейный элемент.

I.V. SOLOVIEV, master student,  
A.I. TEREKHOV, candidate of technical Sciences, associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: ilyasoloviyov@mail.ru<sup>1</sup>, terehov@eims.ispu.ru<sup>2</sup>*

### Controller with variable structure linear density of textile tape

**Abstract.** Propose variant of the construction of the regulator with a linear density of textile tapes based on the use of a complex nonlinear element that allows you to shape the device such positive qualities as high processing speed while maintaining sufficient accuracy, cite the results of computer simulations of the element of regulator.

**Key words:** exhaust device, a linear density, a controller, a non-linear element.



Устройство работает следующим образом. Датчик 1 линейной плотности ленты (например роликовый) фиксирует толщину ленты, преобразует ее в механическое перемещение пазовых роликов и вырабатывает на своем выходе электрический сигнал, пропорциональный линейной плотности. Этот сигнал центрируется путем сравнения с заданным, поступающим от задатчика 3 линейной плотности ленты, соответствующим номинальному значению линейной плотности. Эта операция осуществляется элементом 2 сравнения. Тем самым на вход знакочувствительного усилителя 4 и порогового элемента 5 поступает сигнал положительного или отрицательного знака в зависимости от знака отклонения плотности от номинальной и представляющий собой аналоговую величину. Известно, что лента имеет определенный допустимый разброс плотности относительно номинального значения. Это значит, что отклонение плотности от номинала менее допустимого считают нормальным. В случае перехода линейной плотностью этого предела на ленте появляется брак. Рассмотрим работу устройства в случае малого отклонения линейной плотности от номинальной. При этом пороговый элемент 5 настроен так, что напряжение на его выходе появляется только в случае превышения линейной плотностью заданного предела как вниз, так и вверх от номинала. В рассматриваемом случае напряжение на выходе порогового элемента 5 равно нулю и канал управления, образованный коммутатором 6, источниками 7, и 8 положительного и отрицательного напряжений, отключен, Сигнал с элемента сравнения 2 поступает на вход знакочувствительного усилителя 4. Знакочувствительный усилитель увеличивает мощность сигнала, оставляя без изменения знак отклонения, Тем самым на сумматор 9 поступает сигнал, пропорциональный плотности ленты. Этот сигнал без изменения подается на электропривод 10, жестко связанный с редуктором 11. Скорость выпускной пары вытяжного прибора в этом случае изменяется пропорционально линейной плотности. В зависимости от знака отклонения ее от номинала скорость либо увеличивается, либо уменьшается относительно заданной по линейному закону. Этот канал регулирования работает непрерывно. Данный режим работы соответствует линейному участку характеристики вход-выход регулятора (рис. 2).

Приведенная на рис.2 характеристика представляет собой зависимость скорости вращения вытяжной пары  $n_{вп}$  от величины отклонения толщины ленты  $\Delta Q$  от номинального значения. Так, в рассмотренном выше примере при отклонении толщины ленты от заданной в пределах  $\pm \Delta Q_{\max}$  скорость выпускной пары роликов изменяется линейно (наклонный участок характеристики), когда с ростом толщины ленты скорость электропривода 10 увеличивается пропорционально, обеспечивая точность стабилизации выходного полуфабриката. При этом наклон характеристики может быть изменен путем выбора коэффициента усиления знакочувствительного усилителя 4.

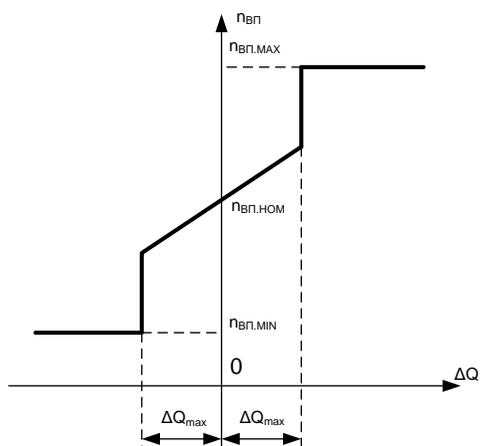


Рис. 2. Характеристика «вход-выход» регулятора

Пусть теперь лента имеет отклонение плотности вверх от номинального значения на величину больше, чем  $\Delta Q_{\text{MAX}}$ . В этом случае срабатывает пороговый элемент 5, подавая на первый вход коммутатора 6 сигнал о знаке отклонения. Коммутатор 6 подключает на второй вход сумматора 9 положительное напряжение, поступающее на второй вход коммутатора от источника 7 положительного напряжения. Тем самым, напряжение на выходе сумматора 9 увеличивается, заставляя электропривод 10 исполнительного механизма форсировано увеличить скорость выпускной пары вытяжного прибора и тем самым быстро уменьшить плотность ленты, вводя ее в допустимую зону. В случае уменьшения плотности за зону, определяемую величиной  $\Delta Q_{\text{MAX}}$ , пороговый элемент 5 включает коммутатор 6 таким образом, что на входе сумматора 9 появляется величина отрицательного напряжения, поступающего от источника 8 через третий вход коммутатора 6. Поскольку на первом входе сумматора 9 уже имелось отрицательное напряжение, обусловленное действием усилителя 4, на выходе сумматора напряжение еще больше уменьшится. Это приводит к снижению скорости электропривода 10. Лента "сгустится". Тем самым описываемое устройство совмещает точность аналогового регулирования в зоне малых отклонений плотности от номинала и быстродействие релейного регулирования при отклонениях плотности ленты сверх допустимых, путем изменения своей структуры. Увеличение быстродействия регулятора позволяет увеличить точность поддержания линейной плотности ленты, плотность которой выходит за заданные границы, а также

применять подобную систему на высокопроизводительных текстильных машинах.

Для проверки работоспособности устройства в программном комплексе MATLAB была составлена модель блока, формирующего испытательный сигнал на входе устройства, представленная на рис. 3.

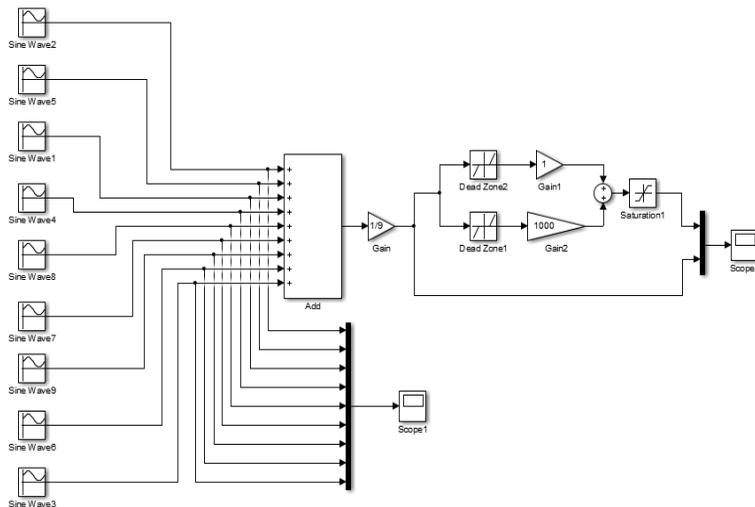


Рис. 3. Модель блока формирования испытательного сигнала в программном комплексе MATLAB

Для формирования испытательного сигнала была использована информация о спектральной плотности неровности чесальной ленты, полученная с помощью емкостного прибора фирмы Цельвегер Устер. Спектрограмма участка чесальной ленты представлена на рис. 4.

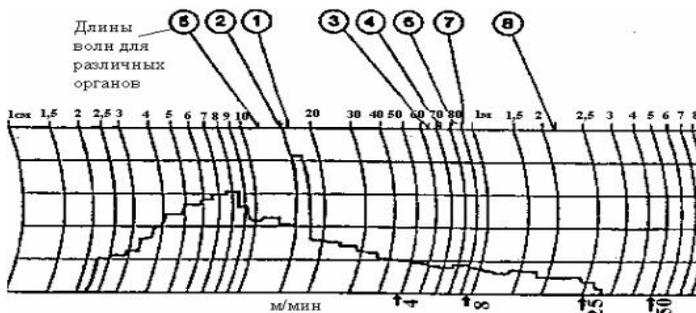


Рис. 4. Спектрограмма неровности чесальной ленты

Анализ спектрограммы позволил выбрать восемь источников синусоидального входного напряжения различной частоты, вносящих наибольший вклад в неровноту, что позволило смоделировать переходную характеристику блока в виде временной диаграммы (рис.5).

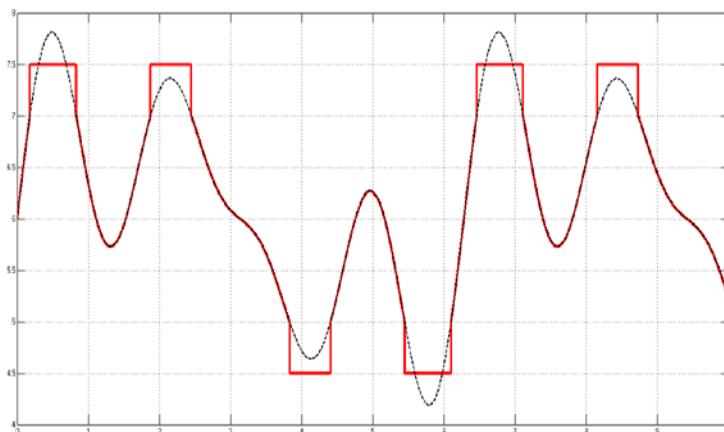


Рис. 5. Переходная характеристика блока

Полученный вид переходной характеристики будет использован в идее управляющего сигнала для синтеза регулятора, обеспечивающего заданные показатели качества работы предложенного устройства.

#### **Выводы:**

1. Предложен вариант реализации регулятора линейной плотности чесальной ленты, новизна которого подтверждена охранным документом.
2. На основе анализа данных о спектральной плотности чесальной ленты разработана вычислительная модель блока формирования испытательного сигнала, позволяющая оценить степень работоспособности регулятора после его синтеза.

#### **Литература**

1. **Баранова А.А.** Ленточные машины для хлопка методические указания к лабораторной работе по курсу «Механическая технология текстильных материалов» «Витебский государственный технологический университет», Витебск, 2005.
2. **Коган, А. Г.** Новое в технике прядильного производства: учеб. пособие / А. Г. Коган, Д. Б. Рыклин, С. С. Медвецкий. – Витебск: УО «ВГТУ», 2005.
3. **А.с. 981470, МКИ<sup>3</sup> D 01 H 5/38.** Устройство с переменной структурой линейной плотности ленты / Ю.В. Закорюкин, А.И. Терехов, Ю.А. Ершов (СССР). – № 3285784/28-12; заявл.06.05.81; опубл. 15.12.82, Бюл.№ 46.

УДК 621.38

А.М. АББЯСОВ, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
E-mail: alex@eims.ispu.ru

## Демонстрационная плата Smart Fusion2 Starter Kit

**Аннотация.** Ознакомление с демонстрационной платой Smart Fusion2 Starter Kit. Представлены основные характеристики чипа и подключаемой к нему периферии. Описаны преимущества данного типа ПЛИС.

**Ключевые слова:** программируемая логическая интегральная схема, система на кристалле.

A. M. ABBYASOV, senior lecturer  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: alex@eims.ispu.ru

## Demonstration board Smart Fusion2 Starter Kit

**Abstract.** Familiarization with the demonstration Board Smart Fusion2 Starter Kit. The main characteristics of the chip and connected to it peripherals. Describes the advantages of this type of FPGA.

**Key words:** programmable logic integrated circuit, system-on-chip.

Демонстрационная плата Smart Fusion2 Starter Kit для ознакомления с новым СМК Smart Fusion2, которую разработала и выпустила на рынок Корпорация Microsemi, включает в себя энергонезависимую матрицу ПЛИС, выполненную по Flash-технологии, а также полноценную аппаратную процессорную подсистему на базе процессора ARM Cortex™ M3 с набором периферии. Кроме этого, в неё входят высокоскоростные последовательные приемопередатчики 5Гб/с и контроллеры памяти DDR (рис. 1).

ПЛИС Fusion объединяет в одной микросхеме конфигурируемые аналоговые блоки, блоки FLASH-памяти большого объема, комплексные схемы генерации тактовых сигналов и высокопроизводительную программируемую логику на основе FLASH. Инновационная архитектура Fusion может быть использована с программным ядром MCU Корпорации Microsemi, а также с 32-разрядными ядрами ARM Cortex-M1 увеличенной производительности.

**Особенности архитектуры.** В основе семейств SmartFusion2 (как и IGLOO2) лежит одна и та же архитектура ПЛИС. В какой-то степени можно считать, что основное различие между семействами — это наличие в SmartFusion2 микроконтроллерной подсистемы на базе ядра ARM Cortex-M3. Кроме того, набор функциональных блоков в этих семействах заметно различается.

ПЛИС обоих семейств принадлежат к классу так называемых flash-based FPGA. В таких ПЛИС конфигурационная flash-память равномерно распределена по площади кристалла. Это дает следующие преимущества:

- Не требуется микросхема внешней конфигурационной памяти и, соответственно, загрузка конфигурации из нее. Отсюда следуют два полезных свойства: 1) ПЛИС готова к работе практически сразу после включения; 2) во время загрузки конфигурации невозможно подключиться к потоку конфигурационных данных и считать его.
- Такая конфигурационная память не подвержена однократным сбоям, что повышает надежность в условиях сильных помех и ионизирующих излучений.

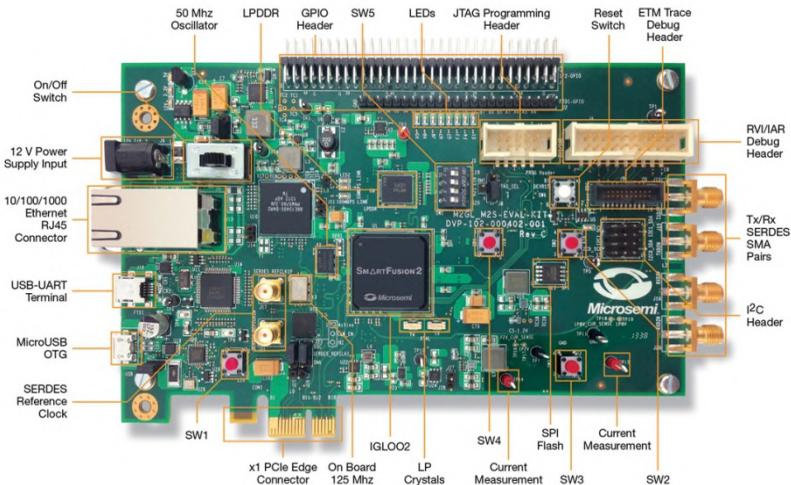


Рис. 1. Демонстрационная плата Smart Fusion2 Starter Kit

Базовая ячейка матрицы ПЛИС SmartFusion2 состоит из комбинационных и последовательных блоков. Комбинационные блоки (рис. 2) представляют собой четырехходовые LUT (LookUp Table) с цепями переноса. Последовательные блоки в Smart-Fusion2 – это отдельные триггеры, которые можно использовать независимо от LUT (рис. 1). Такой триггер может быть сконфигурирован как регистр или как защелка. У него есть вход данных, и опционально могут использоваться вход разрешения и входы асинхронной и синхронной загрузки (сброса и установки).

**Пониженное энергопотребление.** Рекордно низкая потребляемая мощность – это одна из наиболее сильных сторон семейств Smart Fusion2 и IGLOO2. В них реализован режим особо низкого потребления Flash\*Freeze. В этом режиме статическое потребление микросхемы

может составлять менее 1 мВт. Устройства могут легко входить в этот режим и выходить из него с сохранением текущего состояния, линий ввода/вывода и регистров. Потребляемая мощность узлов SERDES может быть до 13 мВт/Гбит на канал.

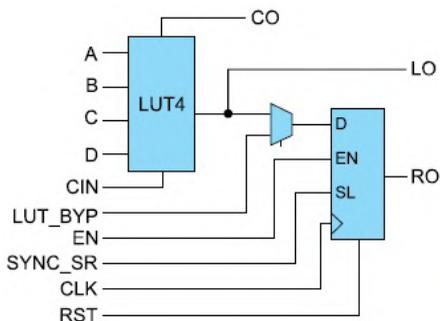


Рис. 2. Базовая ячейка матрицы ПЛИС SmartFusion2

Суммарная экономия потребляемой мощности для устройств SmartFusion2 и IGLOO2 может составлять до 50% по сравнению с конкурирующими решениями. На рис. 3 представлено сравнение различных составляющих потребляемой мощности для SRAM FPGA и Flash FPGA фирмы Microsemi. При включении питания и во время конфигурации экономятся сотни милливатт.

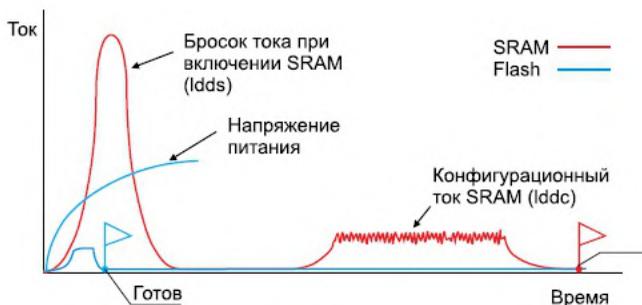


Рис. 3. Сравнение различных составляющих потребляемой мощности для SRAM FPGA и Flash FPGA фирмы Microsemi

### Литература

1. **Иоффе Д. М.** SmartFusion2 и IGLOO2 – надежные, экономичные, компактные. Обзор новых семейств ПЛИС корпорации Microsemi // Компоненты и технологии. — 2014. — № 8. — С. 87.

УДК 681.586.72

А.П. КАРАНДАШЕВ, к.т.н., доцент,  
В.А. АГАПОВ, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: a\_karandashev@mail.ru*

## **Использование учебного комплекса SCADA-PLC для обучения проектированию программного обеспечения АСУ ТП**

**Аннотация.** Предложена эффективная, минимально необходимая последовательность обучения проектированию программного обеспечения верхнего уровня АСУ ТП в среде SCADA-системы СТАЛКЕР.

**Ключевые слова:** SCADA, АСУ ТП, программное обеспечение верхнего уровня, мнемосхема, панель управления, база данных.

A.P. KARANDASHEV, Candidate of Engineering, associate professor,  
V.A. AGAPOV, associate professor,

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: a\_karandashev@mail.ru*

## **The use of the training complex SCADA-PLC for the design of software for process control system**

**Abstract.** Submitted effective minimally required sequence of teaching design of high level software for process control system in SCADA-system STALKER.

**Key words:** SCADA, process control system, high level software, control panel, database.

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) имеют многоуровневую иерархическую структуру. Около 85% из них реализованы по двухуровневой структуре с возможностью передачи информации на корпоративный уровень.

Такой унифицированный подход к построению систем управления (СУ) стал преобладать не только в традиционных АСУ ТП промышленных предприятий, но и в СУ отдельных технологических установок, особенно комплектных. В энергетике это комплектные САУ ГРС, БППГ, ЦТП, ПНС, ГТУ, ГПУ, котельных, бойлерных и т.д.

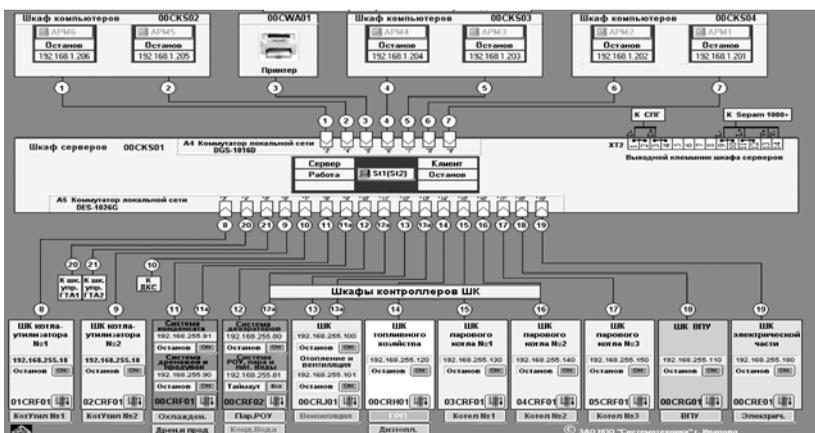
При разработке АСУ ТП в составе проекта раздел программного обеспечения (ПО) является наиболее трудоемким и дорогим, а в совокупности с информационным обеспечением (ИО) эти разделы часто превышают половину стоимости проекта.

Оборудование, установленное в учебном классе SCADA-PLC, позволяет проводить обучение проектированию разделов ПО и ИО АСУ ТП

как для верхнего уровня системы, так и для нижнего уровня, а также выбирать и проверять способы передачи данных между PLC и SCADA.

Проектирование ПО нижнего уровня выполняется в программной среде Melsect (Mitsubishi Electric).

Проектирование ПО и ИО верхнего уровня выполняется с помощью SCADA-системы Сталкер (НПО Системотехника). Выбор этой SCADA в качестве учебной объясняется ее широкими возможностями, среди которых: работа в 32/64 разрядных ОС; низкие требования к вычислительным ресурсам; полная функциональность учебного пакета; совмещенная среда проектирования и исполнения в режиме реального времени; низкие трудозатраты на обучение проектированию; большое количество внедрений в энергетике.



Обучение проектированию производится в несколько этапов.

1. Изучение возможностей SCADA-системы путем исследования готового проекта АСУ ТП ТЭЦ.

В качестве исследуемого выбран проект АСУ ТП паргазовой ТЭЦ в составе трех энергетических котлов, двух турбогенераторных установок ТГУ, двух газотурбинных установок ГТУ, двух котлов-утилизаторов, установок водоподготовки ВПУ, топливного хозяйства, дожимной компрессорной станции ДКС и т.д.

Исследуются функции ПТК АСУ ТП:

- сбор, контроль достоверности и первичная обработка данных;
- отображение информации на экране дисплеев;
- технологическая: аварийная и предупредительная сигнализация;
- автоматическое регулирование и логическое управление;
- автоматические пуски, остановки, дистанционное управление;
- автоматическая синхронизация генераторов с электросетью;

- реализация технологических защит и блокировок;
- расчеты технико-экономических показателей;
- регистрация истории технологического процесса;
- регистрация аварийных ситуаций;
- автоматическое ведение отчетной документации;
- автоматическая диагностика и конфигурирование представленных

ниже технических средств.

2. Обучение проектированию панелей в программе-редакторе «Дизайнер»:

- изучение панели инструментов и файловой структуры рисунков;
- изучение свойств рисунка при редактировании;
- изучение команд редактирования рисунков;
- проектирование статических элементов рисунка;
- проектирование динамических элементов рисунка;
- изучение привязки динамических элементов к базе данных.

3. Создание проекта ПО верхнего уровня в SCADA.

Проект визуализации человеко-машинного интерфейса (HMI) для системы управления технологическим процессом выполняется в несколько этапов:

- установка и контроль запуска нового проекта;
- создание классов базы данных;
- создание объектов базы данных;
- создание перечислений базы данных;
- создание изображений графических экранов;
- создание основной панели;
- привязка динамических элементов к базе данных;
- создание панелей управления исполнительных механизмов;
- составление дерева панелей и клавиш включения панелей;
- проверка динамических элементов в режиме коррекции;
- создание групп архивов;
- создание панели архивного отчета;
- проверка управления в режиме исполнения;
- проверка оперативной тенденции;
- создание регистратора событий;
- создание панели «журнал событий»;
- создание панели отчета;
- проверка оперативной последовательности;
- настройка окна неподтвержденных сообщений;
- создание и настройка «пользовательской системы»;
- настройка работы в сетевом режиме «сервер-клиент».

4. Подключение программируемого логического контроллера PLC к SCADA выполняется:

- через OPC-сервер;
- через протокол ModBus TCP.

Выполнение описанного порядка проектирования позволяет получить первоначальные навыки по созданию программного обеспечения верхнего уровня для ПТК АСУ ТП.

### Литература

1. **Кузнецова О.К.**, Карандашев А.П. Разработка HMI-интерфейса в SCADA-системе *СТАЛКЕР*: Метод. Пособие /ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 80 с.
2. **Приемышева И.Н.**, Карандашев А.П. Использование программы «Дизайнер» для разработки графических панелей в SCADA-системе: Метод. пособие /ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 76 с.
1. **Кузнецова** Ольга Кирилловна. Разработка HMI-интерфейса в SCADA-системе *СТАЛКЕР*: метод. пособие /О.К. Кузнецова, А.П. Карандашев; Мин-во образ. и науки Российской Федерации, ФГБОУВО «Иван. госуд. энерг. ун-т им. В. И. Ленина». – Иваново, 2016. – 84 с.
2. **Приемышева** Ирина Николаевна. Использование программы «Дизайнер» для разработки графических панелей в SCADA-системе: методическое пособие /И.Н. Приемышева, А.П. Карандашев; Мин-во образ. и науки Российской Федерации, ФГБОУВО «Иван. госуд. энерг. ун-т им. В. И. Ленина». – Иваново, 2016. – 76 с.

## СЕКЦИЯ 10. «ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.311.24:621.313.12

К.Л. КОВАЛЕВ, д.т.н.,  
Н.С. ИВАНОВ, К.А. НИКИТИН студент

Московский Авиационный Институт, Кафедра 310  
125080 г. Москва, Волоколамское шоссе 4  
*E-mail: n.s.ivanov88@gmail.com1, kirill\_nikitin\_94@mail.ru2*

### **ВТСП синхронный генератор мощностью 5МВА для ветроэнергетической установки**

**Аннотация.** В работе приведены результаты расчета основных параметров полностью сверхпроводникового электрогенератора для ветроэнергетической установки и его сравнение с существующими аналогами.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, сверхпроводимость, синхронный генератор, ВТСП

K. L. KOVALEV, Doctor of Engineering,  
N. S. IVANOV, PhD, K. A. NIKITIN, student

Moscow Aviation Institute, department 310  
125080 Moscow, Volokolamskoe shosse 4  
*E-mail: n.s.ivanov88@gmail.com1, kirill\_nikitin\_94@mail.ru2*

### **HTS wind turbine synchronous generator with capacity of 5MVA**

**Abstract.** This article presents the results of the analytical methodic of calculation of main parameters fully superconducting wind turbine power generator.

**Keywords:** wind power, superconductivity, synchronous generator, HTS

Снижение стоимости вырабатываемой электроэнергии – наиболее актуальная и важная задача современной ветроэнергетики. Для этого необходимо отказаться от мультипликатора и увеличить мощность единичной установки. Для классических генераторов это означает значительное увеличение массы и габаритов [1].

Применение сверхпроводниковых обмоток на статоре и роторе позволит увеличить электромагнитные нагрузки преобразователя, что в итоге приведет к уменьшению его массы и габаритных размеров [2]. Исходя из этого, в работе рассматривается сверхпроводниковый генератор с ВТСП обмотками на роторе и кольцевыми ВТСП обмотками на статоре, работающих при температуре жидкого водорода – 20 К.

При постановке задачи расчета полностью сверхпроводящего генератора в дальнейшем принимаются следующие основные допущения:

- магнитопровод ротора и статора считается ненасыщенными;
- машина считается достаточно длинной,  $\lambda \approx 1$ ;
- отсутствуют потоки рассеяния.

Так как ВТСП лента не допускает малые радиусы изгиба [3], то рациональной схема генератора с беспазовым якорем с кольцевой обмоткой. Расчетная схема такого генератора представлена на рис. 1.

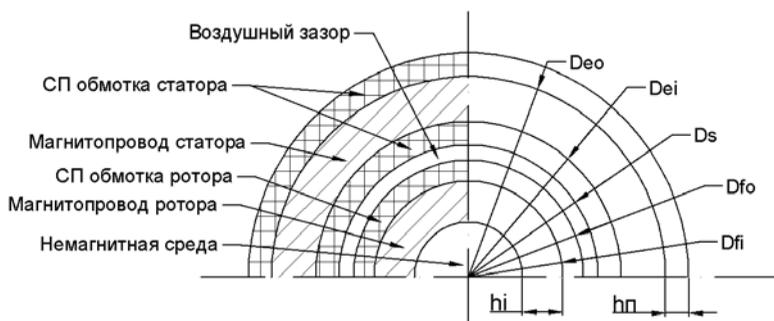


Рис. 1. Расчётная схема ВТСП генератора

На основании закона полного тока [4], а также схемы замыкания магнитного потока в активной зоне (рис. 2), было получено выражение для расчёта удельной мощности преобразователя:

$$P_{y\partial} = \frac{8mI_a k_o f W_a I_f b_k \Delta f \mu_0 L_s \pi \mu h_i}{m \sum h_l b_l} x \quad (1)$$

$$\times \left[ 4\mu h_i \left( \frac{\pi \Delta f}{b_p} + p \left( 1 - D_1 \cos\left(\frac{\pi p}{4}\right) \right) + \frac{2}{D} \right) + \pi^3 (D_3 + 2H + 1) h_i + \pi b_p \right]^{-1}$$

где  $m$  – число фаз выходного напряжения;  $I_a$  – ток обмотки якоря (ОЯ), А;  $k_o$  – обмоточный коэффициент;  $f$  – частота выходного напряжения, Гц;  $W_a$  – число витков ОЯ;  $I_f$  – ток обмотки возбуждения (ОВ), А;  $b_k$  – общая ширина ВТСП ленты катушки ОВ, мм;  $\Delta f$  – высота ОВ;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $L_s$  – длина активной зоны машины, мм;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость стали;  $h_i$  – толщина ярма индуктора, мм;  $m \sum$  – масса активной зоны машины, кг;  $h_n$  – высота ВТСП ленты, мм;  $b_l$  – ширина ВТСП ленты, мм;  $p$  – число пар полюсов генератора;  $b_p$  – общая ширина катушки ОВ, мм;  $h_n$  – высота катушки ОЯ, мм;  $h_a$  – толщина ярма якоря, мм;  $D_1 = D_{fo}/D_s$ ;  $D = (D_s/h_n) + 1$ ;  $D_3 = D_s/h_a$ ;  $H = h_n/h_a$ .

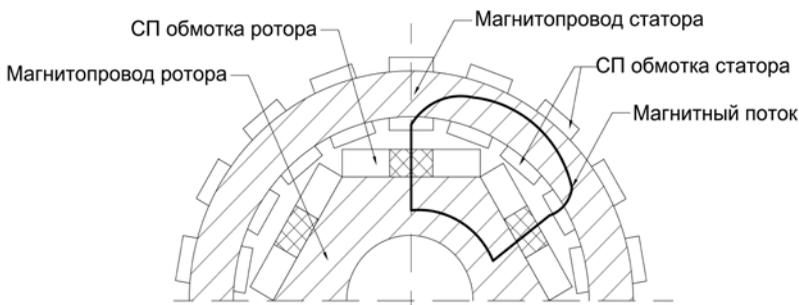


Рис. 2. Схема замыкания магнитного потока

Как видно из соотношения (1), мощность и массогабаритные показатели генератора зависят от большого числа переменных. На рис. 3,а приведена зависимость удельной мощности генератора от числа пар полюсов. С применением средств автоматизации по полученному выражению (1) был спроектирован тихоходный ВТСП генератор мощностью 5МВА. Сравнение характеристик полученного преобразователя с существующими мировыми аналогами представлено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение спроектированное генератора с аналогами

Название генератора/ разработчик	GE 10/ General Electric	Model A/ University of Houston	Генератор Haliade 150/ Alstom	Разработанный генератор
$P_n$ , МВА	10	2	6	5
$D_s$ , мм	4328	2688	≈12 000	1500
$n$ , мин-1	10	18	11	15
$p$	36	28	—	20
$m$ , т	98	222	265	5,6
$P_{уд}$ , кВт/кг	0,102	0,015	0,023	0,87

Как видно из табл. 1, масса полученного генератора, приходящаяся на единицу мощности, значительно ниже существующих мировых аналогов. Внешняя характеристика полученного генератора представлена на рис. 3б. Видно, что кривая внешней характеристики является довольно жесткой, т.к. при номинальном значении тока нагрузки, напряжение генератора составит  $U_n = 410$  В, что незначительно ниже ЭДС холостого хода  $E_{xx} = 470$  В.

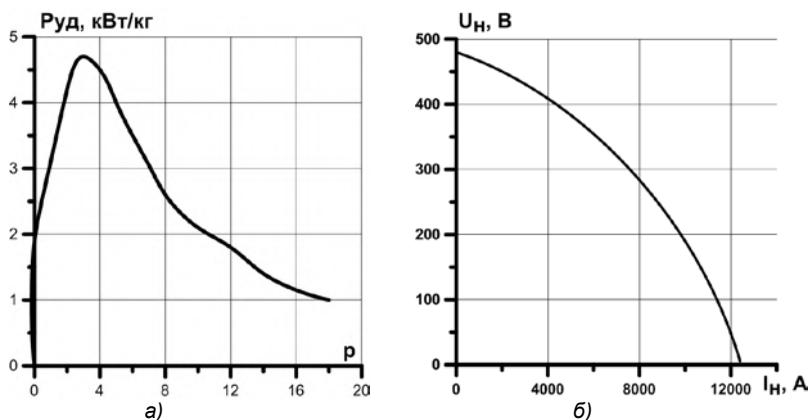


Рис. 3. а – внешняя характеристика генератора; б – зависимость удельной мощности генератора от числа пар полюсов

**Вывод:** таким образом, применение ВСТП генератора в ветроэнергетической установке, позволяет увеличить мощность единичной установки, существенно снизить массу и габариты установки в целом, что играет решающую роль в снижении стоимости вырабатываемой электроэнергии.

#### Литература

1. **Быстрицкий Г.Ф.** Общая энергетика / Г.Ф. Быстрицкий. – Москва: Академия, 2005. – 208 с.
2. **Безруких П.П.** Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). – Москва: ИД ЭНЕРГИЯ, 2010. – 315с.
3. **Щербаков В.** ВТСП провода 2-го поколения: от пилотной технологии к промышленной / Сверхпроводники для электроэнергетики [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://perst.isssp.kiae.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
4. **Вольдек А.И.** Электрические машины. Машины переменного тока / А.И. Вольдек, В.В. Попов – Санкт-Петербург: Питер, 2008. – 320 с.

УДК 004.896; 621.313.33

А.С. КОБЕЛЕВ, к.т.н., начальник расчетно-теоретического сектора

ПАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (НИПТИЭМ)  
600009 г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1  
*E-mail: a.kobelev@ruselprom.ru*

## **Концепция многоагентной системы поискового проектирования асинхронных двигателей**

**Аннотация.** Разработана технология поискового проектирования асинхронных двигателей, использующая методологию распределенного искусственного интеллекта. Компоненты системы – интеллектуальные агенты содержат, в рамках своей компетенции, элементарные приемы проектирования и планировщики, формирующие стратегии принятия проектных решений. Затронут вопрос о применении теории иерархических кооперативных игр при поиске эффективных решений в классе задач «многообъектная оптимизация».

**Ключевые слова:** поисковое проектирование, асинхронный двигатель, распределенный искусственный интеллект, интеллектуальные агенты.

A.S. KOBELEV Candidate of Engineering, Chief of theoretical department

PJSC «Scientific Research and Design Institute of Technology Electrical Engineering»  
Russia, 600009, Vladimir, Electrozavodskaya street, 1  
*E-mail: a.kobelev@ruselprom.ru*

## **The concept of a multi-agent system for the search design of induction motors**

**Abstract.** The technology of search design of induction motors is developed, using the methodology of distributed artificial intelligence. System components - intelligent agents contain, within their competence, basic design techniques and planners, which formulate strategies for making design decisions. The problem of applying of the theory of hierarchical cooperative games in the search for effective solutions on the class of «multi-object optimization» problems is also raised.

**Key words:** search design, asynchronous motor, distributed artificial intelligence, intelligent agents.

В ряде работ [1, 2] для поискового проектирования нами предлагается использовать новую технологию (методологию) проектирования электрических машин, основанную на многоагентных системах [3] поддержки принятия решений. Система проектирования объединяет 12 интеллектуальных модулей–агентов, ответственных за принятие решений в области электромеханических, тепловых, виброшумовых и др. показателей, а также различных конструктивных реализаций. Рассмотрены и агенты, ответственные за экономические решения.

Теоретико-множественное описание агента [2, 4] интеллектуальной системы проектирования:

$A = \langle \text{Name, Prior, SAA, ENVA, GIA, KBA, PlanA, ACTA, MTA, ResA, CMdA} \rangle$   
 где Name – имя агента;

Prior – приоритет агента;

**ENVA** – множество доступных агенту моделей окружения; здесь же определяется множество **Eff** воздействий на агент со стороны среды;

**SAA** – структура атрибутов, описывающих состояние и поведение агента;

$SA = \langle NA, DA, TA, VA \rangle$ ,

где *NA* – имя атрибута; *DA* – диапазон, на котором определяется значение атрибута, *TA* – тип атрибута, *VA* – текущее значение в данный момент времени.

**GIA** – множество целей агента;

**KBA** – иерархическая база знаний агента, имеющая три уровня:

- нижний уровень содержит «атомарные знания», иначе наименьшие гранулы информации по решению задачи, например, не оцифрованный по значимости перечень мероприятий по снижению активного сопротивления обмотки статора;
- второй уровень содержит множество тактик, типовых стратегий, знаний из факторного анализа, это так называемые *убеждения* агента в терминах BDI-архитектуры;
- высший уровень иерархии содержит знания о других агентах системы, о совместных тактиках и стратегиях;

**PlanA** – множество функций (механизмов), которые формируют планы действий агента. Реализация этих функций, закреплена за планировщиком, который работает с тремя выше названными уровнями БЗ.

- На нижнем уровне отрабатываются прямые, заранее заготовленные действия – реакции агента на стандартные ситуации, например, выбор и генерация чертежа ДСЕ по набору входных атрибутов. Данный submodule планировщика называется рефлектором;
- На среднем уровне, с применением графов, строится общий план (стратегия), опирающийся на тактики и данные факторного анализа, либо на информацию о типовых стратегиях, содержащихся во фрейм-концептах [3];
- на высшем уровне планировщик участвует в планировании кооперативного поведения агентов;

**ACTA** – множество действий, подлежащих непосредственному выполнению – свободных от запретов и существенных ограничений, налагаемых другими агентами и средой;

**MTA** – собственные методы агента;

**ResA** – собственные ресурсы агента,

CMdA – модели коммуникации агента со средой и с другими агентами.

Далее в докладе в «вопросо-ответной форме» обосновывается целесообразность описываемого подхода.

**Почему** ищем проектное решение, используя методологию распределенного искусственного интеллекта? Проектирование – это всегда поиск решений на множестве альтернатив. Глубина созданных моделей, методов и объем неструктурированных знаний, полученных при разработке технических систем, (что потенциально формирует мощные множества альтернатив принятия решений) превышают человеческие возможности по восприятию и обработке информации. «Перекокс» объема предметных знаний над их эффективным использованием стал научной проблемой, в т.ч. электромеханики. В качестве примера укажем, что тяговый АЭД для конкретного транспортного средства может быть выполнен в «длинной» или «короткой» реализации, с медной, либо алюминиевой клеткой ротора, со вспыной обмоткой, либо жесткими секциями, при  $2p=4, 6, 8, 12$ ; при нескольких (более 5) вариантах системы охлаждения. Критериальная проработка основных решений в увязке с требуемыми тяговыми характеристиками, резко уменьшает число альтернатив. Формализованный анализ этой задачи целесообразно поручить интеллектуальным агентам.

**Где**, в каких подпространствах универсального множества решений класса «асинхронный двигатель» **UIM\_PCM** ищем эффективные альтернативы? Ранее отмечалось, что пространство **UIM\_PCM** должно быть поделено на подклассы в зависимости от требований к электро-механическим характеристикам, причем в русле обсуждаемой методологии кластеризация должна быть более детальной, нежели это обсуждалось в [6]. К ресурсам агента ResA относятся, в том числе, базы данных аналогов, представленные в виде метамоделей [2]. Отметим, что экземпляр класса метамоделей является не физическим экземпляром, а объектом, имеющим определенный уровень абстракции, т.е. экземпляр класса порождает ряд физических экземпляров на уровне поискового проектирования.

**Что** ищем? Общая цель проектирования – это удовлетворение техническим требованиям при минимизации затрат на производство. Тем, не менее, вопрос о корректной формулировке целевой функции далеко не тривиален. Можно выделить, по меньшей мере, четыре случая.

а) Целевая функция, состоит из единственного критерия, который следует максимизировать/минимизировать, а остальные показатели переводятся в ограничения. Примером является разработка единичного АЭД общепромышленного применения, когда минимизируется тот или иной экономический показатель, а технические характеристики переводятся в ограничения.

б) Целевая функция состоит из вектора критериев. Примером является разработка единичного тягового двигателя, целевая функция

при проектировании которого включает ряд критериев, например: себестоимость, массу, объем, норму КПД, норму тока обмотки статора.

с) Целевая функция при одновременном проектировании нескольких (многих) объектов. Примером является проектирование габарита серии АД, включающего несколько чисел пар полюсов, длин сердечников, классов энергоэффективности. В этом случае неизбежны уступки качества в пользу унификации, более того даже в рамках одного варианта «2р» существуют компромиссы между качеством и себестоимостью. Общее выражение целевой функции здесь:

$$W(N) = \max_{s \in S} \sum_{n \in N} W^n(s)$$

где  $N=1, \dots, n$  – число размеров на габарит,  $S$  – множество стратегий,  $W^n$  – частичная целевая функция,  $W(N)$  – общая целевая функция.

d) Целевая функция содержит критерии с элементами неопределенности, например, стохастического характера.

**Как** ищем? Случай а) соответствует однокритериальной оптимизации; случай б) – многокритериальной оптимизации; в случае с) может быть применена теория иерархических кооперативных игр; случай d) относится к общей теории исследования операций.

Важное замечание. Теория иерархических кооперативных игр может быть успешно применена и при однокритериальной оптимизации, поскольку и в этом случае в процессе поиска решения участвуют разноплановые агенты, борющиеся за качество своих частичных задач, что подразумевает борьбу за ресурсы.

**Чем** ищем? Эта часть доклада посвящена математическим моделям, к которым обращаются алгоритмы оптимизации на каждом шаге поиска. Особое внимание уделено приемам, позволяющим избежать внутренних итераций между подсистемами на каждом шаге, например, изыскать уточнения потерь по результатам тепловых расчетов.

Наконец, раздел доклада «**кем** ищем» посвящен взаимодействию агентов в многоагентной среде, роли агента субординатора и, разумеется, степени влияния ЛПР на работу описываемой системы.

Теория многоагентных систем, совмещенная с теорией иерархических кооперативных игр представляется мощной методологией для построения интеллектуальных САПР XXI века.

#### Литература

1. **Кобелев А.С.** Развитие систем искусственного интеллекта и смена парадигмы при создании систем автоматизированного проектирования // Сборник докладов научно-технической конференции РАН «Актуальные вопросы и перспективы электромашиностроения. Москва, 2015. С. 147–153.
2. **Кобелев А.С.** Особенности создания многоагентной системы интеллектуального проектирования электрических машин // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT'16). Т. I. Таганрог. Изд-во ЮФУ. 2016Т. С. 191–200.

3. **Швецов А.Н.** Модели и методы построения корпоративных интеллектуальных систем поддержки принятия решений: Дис... д-ра техн. наук. М.: РГБ, 2005. 461 с.
4. **Паронджанов С.С.** Модели, методы и программные средства организации взаимодействия интеллектуальных агентов: Автореферат дис... к-на техн. наук. Москва, – 2008. 22 с.
5. **Васин А.А., Краснощеков П.С., Морозов В.В.** Исследование операций. – М.: «Академия». 2008. 464 с.
6. **Кобелев А.С.** Применение кластерного анализа в многопоточном проектировании активных частей асинхронных электродвигателей // Электротехника. – 2015. № 3. С. 8–15.
7. **Кобелев А.С.** Концепция многоагентной системы поискового проектирования асинхронных двигателей. В настоящем сборнике.

УДК 621.313.33

А.В. БЕЛЯЕВА<sup>1</sup>, инженер,  
А.С. КОБЕЛЕВ<sup>2</sup>, к.т.н., начальник РТС

ПАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский технологический институт электромашиностроения» (НИПТИЭМ)  
600009 г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1  
*E-mail: belyaeva\_nas@mail.ru<sup>1</sup>, a.kobelev@ruselprom.ru<sup>2</sup>*

### **Анализ чувствительности КПД асинхронного двигателя к ключевым конструктивным параметрам**

**Аннотация.** Проанализировано влияние коэффициента заполнения паза, активной длины сердечника статора, удельной электрической проводимости материала клетки ротора, удельных потерь в электротехнической стали, внешнего диаметра сердечника статора на величину КПД асинхронного двигателя.

**Ключевые слова:** поисковое проектирование, асинхронный двигатель, электромагнитный расчет.

A.V. BELAYVA, engineer,  
A.S. KOBELLEV Cand. Eng., Chief of theoretical department

PJSC «Scientific Research and Design Institute of Technology Electrical Engineering»  
Russia, 600009, Vladimir, Electrozavodskaya street, 1  
*E-mail: belyaeva\_nas@mail.ru<sup>1</sup>, a.kobelev@ruselprom.ru<sup>2</sup>*

### **The sensitivity analysis of the efficiency of induction motors to the basic design parameters**

**Abstract.** The influence of the slot factor, the active length of the stator core, the specific electric conductivity of the material of the rotor cell, the specific losses in electrical steel, and the outer diameter of the stator core on the efficiency of the induction motor is analyzed.

**Key words:** search design, asynchronous motor, electromagnetic calculation.

С начала XXI столетия по настоящее время наблюдается рост требований к энергоэффективности асинхронных двигателей. В текущий

момент всеобщепотребительным является «высокий» класс энергоэффективности  $IE2$  по [1]; в ближайшее время он будет вытеснен классом энергоэффективности  $IE3$ . Отметим, что этот процесс идет медленнее, чем предусмотрено решением Еврокомиссии [2]. Россия отстает от Европы по внедрению энергоэффективных (ЭЭФ) АЭД примерно на 5–7 лет. Так, до сих пор не принят технический регламент «О требованиях к энергетической эффективности электрических энергопотребляющих устройств» [3]. Научно-практические исследования ЭЭФ АЭД, несомненно, ускорят их массовое внедрение. Переход от  $IE2$  к  $IE3$  подразумевает более глубокое и многоплановое варьирование показателями, влияющими на КПД. Сказанное говорит об актуальности темы, вынесенной в заголовок, тем более, что авторы проводят анализ чувствительности КПД асинхронного двигателя к базовым конструктивным параметрам в широком диапазоне мощностей для различных серий АЭД.

Изменение любого параметра, связанного с электромеханическим преобразованием энергии, влияет на всю гамму выходных электромеханических характеристик. Эта связность приводит к желанию полностью отказаться от факторного анализа и решать прямые задачи оптимизации при варьировании большим числом входных переменных. Тем не менее, можно выделить 5 показателей, которые, при соответствующей интерпретации некоторых входных и выходных данных, позволят судить о влиянии этих параметров собственно на КПД, что в конечном итоге позволит оценить эффективность различных мероприятий по увеличению энергоэффективности. Перечислим эти переменные:

1. **Коэффициент заполнения паза  $K_{з\text{ап}}$ .** Оказывает доминирующее влияние на КПД. Рост  $K_{з\text{ап}}$  так же увеличивает теплопроводность паза и дополнительно снижает  $\Theta Cu$ ; совсем незначительно увеличивает  $E_1$ . В работе  $K_{з\text{ап}} = (0,6 \div 0,84)$ , что соответствует технологическим приемлемым значениям. Корректировки прочих входных параметров не требуется.

2. **Активная длина сердечника статора  $LS$ .** Оказывает значительное влияние на КПД. Корректный вычислительный эксперимент может быть поставлен следующим образом. Выдерживается  $K_{з\text{ап}} = \text{const}$ . Увеличение  $LS$  снижает  $B\delta$  и увеличивает  $RS$ ,  $X\sigma S$ ,  $X\sigma R$ , поэтому пусковой момент  $ML$  снижается, что необходимо компенсировать уменьшением числа витков. Сопротивление обмотки статора  $RS$  пропорционально  $LS$  и обратно пропорционально квадрату  $d_{\text{пров}}$ , поэтому потери в обмотке статора  $PCu = IS^2 \cdot RS$  падают и КПД возрастает. Дополнительно  $PCu$  уменьшаются из-за снижения  $\Theta Cu$ . Однако полное «восстановление»  $B\delta$  может привести к чрезмерному росту пускового тока статора  $IsL$  и кажущейся мощности  $SL$ , значение которой регламентировано МЭК [4]. Рекомендуем компенсацию снижения  $B\delta$  проводить таким образом, чтобы  $SL \leq 0,85 \cdot SL_{\text{max}}$ . При этом  $B\delta_{\text{old}} > B\delta_{\text{new}}$ ,

и КПД дополнительно возрастает за счет уменьшения потерь в стали  $P_{Fe}$ . В работе  $L_{smin}=L_{s_{ie1}}$ ;  $L_{smax}=2L_{smin}$ .

3. **Удельная электрическая проводимость материала клетки ротора  $\gamma_R$** . Обратна пропорциональна потерям в клетке ротора  $PAI$ , следовательно, увеличение  $\gamma_R$  приводит к росту КПД. Однако уменьшение  $R'R$  приводит к росту  $IsL$  и снижению  $ML$ . В случае, если  $IsL$  и  $ML$  выходят за пределы, регламентированные [4], приходится изменять топологию паза ротора в сторону небольшого увеличения  $R'R$  и  $X'\sigma R$  для соответствия  $IsL$  и  $ML$  стандарту [4]. Заметим, что исследование влияния параметров проводится от младшей активной длины к старшей и от меньшей энергоэффективности к большей, т.е. начиная с самой короткой длины, при которой  $ML$  и максимальный момент  $MB$  находятся на нижнем пределе [4], индукция в магнитопроводе – предельно допустимая, а  $SL$  существенно ниже  $SL_{max}$ . Поэтому переход от  $IE1$  к  $IE2$  за счет повышения значения  $\gamma_R$ , как правило, не приводит к росту  $IsL$  выше допустимого, а вот ситуация  $ML < ML_{min}$ , вероятна.

4. **Удельные потери в электротехнической стали  $p_{Fe\_уд}$** . Существенно влияют на  $P_{Fe}$  и, следовательно, на КПД, и мало влияют на другие показатели (в этом контексте  $p_{Fe\_уд}$  сродни  $K_{зан}$ ). Тем не менее, у сталей с низкими  $p_{Fe\_уд}$  быстрее «насыщаемая» кривая намагничивания, поэтому их применение увеличивает  $I_0$  и несколько снижает  $\cos\phi$ . Кроме того у этих сталей меньший коэффициент теплопроводности.

5. **Внешний диаметр сердечника статора  $DaS$** . Варьирование этим параметром для выявления влияния собственно на КПД выполним следующим образом. Стартовое значение  $DaS$  исследуемого типоразмера – наименьшее,  $DaS_{min}$ , назначается из внедренных в ранее разработанных сериях (как правило, это серия АИР). Отношение  $DiS/DaS$  – рекомендуемое в руководствах по проектированию ЭМ [5]. Значение  $DaS_{max}$  – максимально реализуемое по технологическим ограничениям [6] (как правило, применялось в серии 4А). При переходе от  $DaS_{min}$  к  $DaS_{max}$  размеры пазовой зоны листа статора кроме шлицевой зоны умножаются на  $DaS_{max}/DaS_{min}$ . Важно отметить, что при этом почти не меняются  $ML$ ,  $MB$ ,  $IsL$ , поэтому корректировку  $B\delta$  выполнять не нужно.

Заметим, что варьирование  $DiS/DaS$  дает противоречивые результаты по ключевым электромеханическим показателям и выполнить его в интересах только КПД весьма затруднительно.

Для единообразной интерпретации результатов, получаемых на различных типоразмерах, относящихся к разным габаритам, приведем КПД к единой норме по выражению:

$$\eta_{oe} = \frac{\eta_x - \eta_{ie1}}{\eta_{ie4} - \eta_{ie1}}$$

где  $\eta_x$  – текущий КПД;  $\eta_{ie1}$ ,  $\eta_{ie4}$  – КПД для энергоэффективности  $IE1$ ,  $IE4$  по МЭК для мощности, числа пар полюсов и частоты питания исследуемого типоразмера.

В качестве иллюстрации приведем табличную зависимость  $\eta_{oe} = f(D_{aS})$  и графические зависимости  $\eta_{oe} = f(K_{зап})$ , рис. 1 и  $\eta_{oe} = f(L_S)$ , рис. 2, для ряда типоразмеров серии ВАЕ и 7АВЕ.

Таблица. 1. Исследование влияния величины внешнего диаметра  $DaS$  на КПД

Габ.	Типоразмер	IE	DaS	Kзап	$\eta$	$\eta_{oe}$	PCu	PFe	Cact	C*act	W $\eta$
180	7AVER180M4	ie1	295	0.8	90.7	0	1197	651	30.46	1	0
	8Au180M4	ie1	313	0.698	91.2	0.119	1098	613	32.65	0.933	0.111
	8Au180M	ie1	313	0.798	91.7	0.238	926	616	34.9	0.873	0.208
200	7AVER200L4	ie1	327	0.762	92.3	0.162	1453	765	41.51	1	0.162
	8Au200L4	ie1	349	0.658	92.5	0.216	1442	687	45.54	0.912	0.197
	8Au200L4	ie2	349	0.77	93	0.351	1208	691	49.2	0.844	0.296
225	7AVER225M4	ie2	368	0.748	93.7	0.444	1322	840	59.67	1	0.444
	8Au225M4	ie2	392	0.651	93.8	0.472	1262	840	64.07	0.913	0.431
	8Au225M4	ie2	392	0.741	94.1	0.556	1076	844	68.97	0.865	0.481

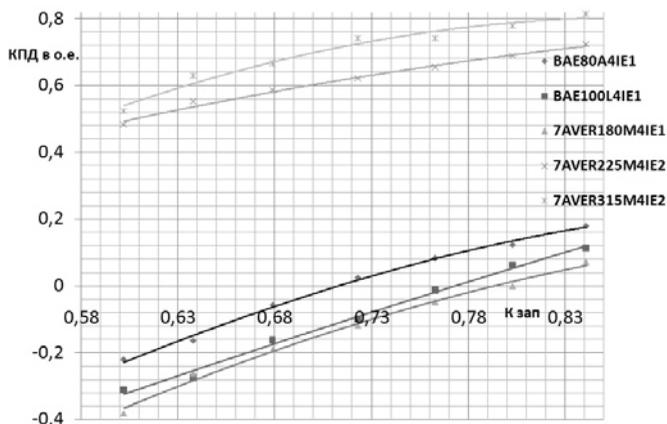


Рис. 1. Исследование влияния коэффициента заполнения паза на КПД

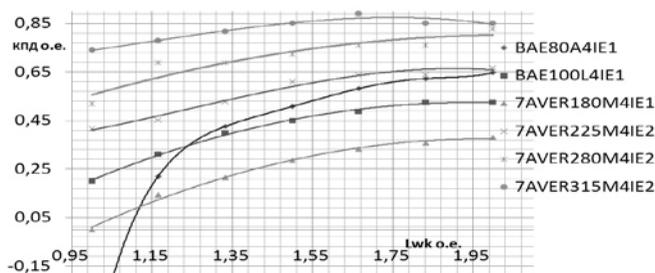


Рис. 2. Исследование влияния активной длины сердечника статора на КПД

В таблице  $C_{act}$  – себестоимость активных частей, причем единицей измерения является стоимость 1 кг обмоточной меди;  $C_{act}^* = C_{act}^{баз} / C_{act}^x$ , где  $C_{act}^{баз}$  – себестоимость активных частей базового АЭД,  $C_{act}^x$  – себестоимость активных частей при варьировании  $DaS$ .  $W_{\eta}$  – показатель, с помощью которого сделана попытка учета экономической эффективности мероприятия по увеличению КПД:

$$W_{\eta} = \eta_{oe} \cdot C_{act}^*$$

На рис. 1 характер кривых для BAE80A4ie1, BAE100L4ie1, 7AVER180M4ie1 схож, что свидетельствует о примерно одинаковой значимости роста КПД за счет  $K_{зал}$  для  $H=80\div 180$  мм. И только с габарита 225 кривая становится более пологой.

На рис. 2 наибольший интерес представляет «насыщаемость» кривых при значительном увеличении длины. Машина начинает «сама себя есть» за счет увеличения потерь в стали, причем для габарита 315 мм наблюдается даже снижение КПД.

Представленный в докладе анализ может быть полезен при проектировании энергоэффективных асинхронных машин, а так же при программировании тактик интеллектуальных агентов, ответственных за поисковое проектирование активных частей АЭД [7].

### Литература

1. IEC 60034-30-1. International standard. Rotating electrical machines – Part 30–1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). – Edition 1.0 2014-03 – IEC, Geneva, Switzerland. – 2014.
2. Commission Regulation (EC) № 640/2009 of 22 July 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign for electric motors // Official Journal of the European Union. – 23.7.2009. – L 191/26 – L 191/34.
3. ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ Таможенного союза «О требованиях к энергетической эффективности электрических энергопотребляющих устройств» (проект).  
– Режим доступа:

<http://www.qgc.ru/upload/medialibrary/b53/b53eeb78ba02d54a9bca43ed4e022f18.pdf>. Дата обращения 21.03.2017.

4. **ГОСТ Р МЭК 60034-12-2009**. Группа E60. Машины электрические вращающиеся. Пусковые характеристики односкоростных трехфазных двигателей с короткозамкнутым ротором. Введ 2011-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011.– 12 с.
5. **Шуйский В.П.** Расчет электрических машин // В.П. Шуйский: сокр.; пер. с нем. Б.А. Цветкова, И.З. Богуславского – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1968. – 731 с.
6. **Кобелев А.С., Макаров Л.Н.** Выбор рационального числа полюсов тяговых асинхронных двигателей при условии постоянства температуры обмотки статора в квазиноминальной точке тяговой характеристики // Материалы XVIII Международ. научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново. 2011. Том 3. С. 188–192.
7. **Кобелев А.С.** Концепция многоагентной системы поискового проектирования асинхронных двигателей. В настоящем сборнике.

УДК 621.313

А.Ю. ГАЛДИН, инж., начальник лаборатории  
А.В. ЗАХАРОВ, к.т.н., вед. специалист  
С.В. СКИТОВИЧ, к.т.н., управляющий директор

ПАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (НИПТИЭМ)  
600009 г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1  
*E-mail: zaharovav@ec.vemp.ru*

## **Экспериментальные исследования характеристик синхронно-реактивных электродвигателей**

**Аннотация.** Предложены способы измерения мощности магнитных и добавочных потерь энергии при определении КПД синхронно-реактивных машин. Приведены экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** синхронные реактивные двигатели, экспериментальные исследования электрических машин, способы определения потерь.

A.Yu. GALDIN, engineer, head of the laboratory;  
A.V. Zakharov, Ph.D., leading specialist;  
S.V. SKITOVICH, Ph.D., managing director

PJSC «Scientific Research and Design Institute of Technology Electrical Engineering»  
Russia, 600009, Vladimir, Electrozavodskaya street, 1  
*E-mail: zaharovav@ec.vemp.ru*

## **Experimental studies of the characteristics of synchronous-reactive electric motors**

**Abstract.** Methods for measuring the power of magnetic and additional energy losses in determining the efficiency of synchronous-reactive machines are proposed. Experimental data are presented.

**Key words:** Synchronous jet engines, experimental studies of electric machines, methods for determining losses.

Энергетические характеристики синхронно-реактивных электродвигателей представляют повышенный интерес [1]. Это объясняется расширением их применения в составе частотно-регулируемого электропривода. Сложность экспериментального определения их характеристик обусловлена затруднениями измерения магнитных потерь необходимых для вычисления КПД при использовании метода отдельных потерь. Кроме того, отдельным вопросом является исследование добавочных потерь в синхронно-реактивных машинах. Методики экспериментального определения магнитных и добавочных потерь энергии для асинхронных двигателей хорошо изучены и представлены в литературе и стандартах в то время, как для синхронно-реактивных электродвигателей такая информация отсутствует. Определение КПД синхронно-реактивных двигателей (СРД) прямым методом, основанным на измерении электромагнитного момента с помощью тензометрических муфт, имеет низкую точность вследствие дрейфа нуля измеренного момента.

Аналитические исследования и моделирование показали, что для снятия характеристики магнитных потерь необходимо в режиме холостого хода увеличивать магнитный поток машины в исследуемом диапазоне напряжения. Обеспечить указанный режим при работе от преобразователя частоты можно двумя способами:

- в векторном режиме управления частотой вращения ротора с датчиком частоты вращения: изменять начальную угловую координату положения датчика в сторону угла, соответствующего внутреннему углу машины с нулевым моментом, и на выбеге ротора проводить измерение входной мощности, действующего значения и частоты напряжения приложенного к обмотке статора, тока. При этом управление магнитным потоком следует осуществлять за счет изменения ограничения тока преобразователя [2, 3];
- при скалярном управлении: плавно провести разгон машины до установленной частоты и изменять напряжение от минимального напряжения до необходимого значения в заданном диапазоне.

Мощность магнитных потерь в отдельно взятом эксперименте вычисляется по формуле:

$$p_{FE} = \left[ P_1 - 3R_1 I_1^2 - p_{MECH} \right] \cdot (f_1 / f_H)^{1,3},$$

где  $P_1$  – измеренная входная мощность двигателя;  $R_1$  – измеренное сопротивление фазы обмотки статора;  $I_1$  – измеренное действующее значение фазного тока;  $p_{MECH}$  – мощность механических потерь на исследуемой частоте вращения;  $f_1$  – измеренная частота питания;  $f_H$  – значение исследуемой частоты (на которую строится аппроксимация).

Для измерения действующего значения частоты тока и напряжения, мощности нами использовался анализатор спектра НЮКИ33900.

На рис. 1 приведена экспериментально снятая зависимость мощности магнитных потерь синхронно-реактивного двигателя 18.5 кВт разра-

ботанного и произведенного ПАО «НИПТИЭМ». В эксперименте был использован первый способ определения магнитных потерь.

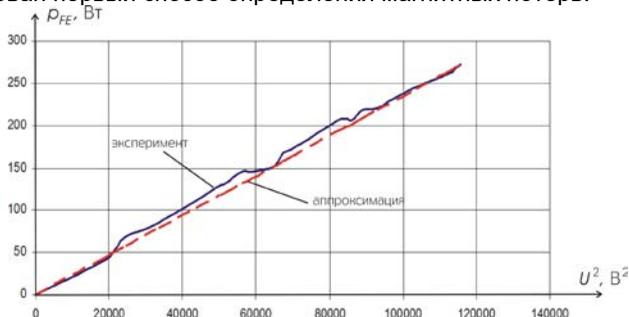


Рис. 1. Экспериментально снятая зависимость магнитных потерь от квадрата напряжения и ее аппроксимация, полученная на двигателе СРД160М6 18.5 кВт

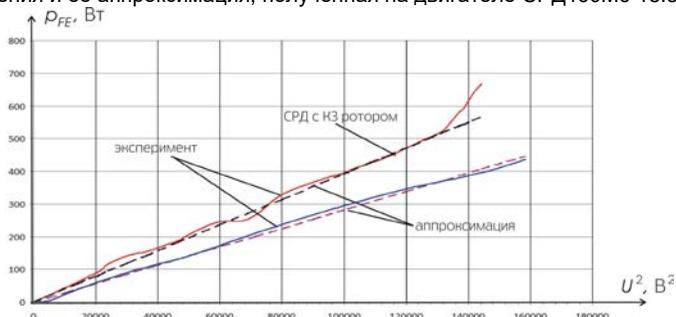


Рис. 2. Экспериментально снятые зависимости магнитных потерь СРД от квадрата напряжения и ее аппроксимации, полученные на двигателях СРД160М6 18.5 кВт с короткозамкнутым ротором и без обмотки на роторе

Анализ зависимости показал линейную зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения, это означает справедливость гипотезы о возможности определения магнитных потерь на основе предложенного способа. Результаты измерения на основе второго способа хорошо сходятся с показанными зависимостями мощности магнитных потерь на основе первого способа, поэтому приводить их графики нецелесообразно.

Следует отметить, что для исследуемых синхронно-реактивных электродвигателей мощность магнитных потерь была ниже, чем у асинхронных двигателей того же габарита на 20-30% при идентичных значениях магнитного потока.

Особый интерес представляют синхронно-реактивные двигатели с короткозамкнутой (КЗ) обмоткой ротора. Такие машины также были изготовлены ПАО «НИПТИЭМ». Сравнительные зависимости мощности

магнитных потерь от квадрата напряжения приведены на рис. 2

Анализ расположения экспериментальных зависимостей показал, что электродвигатели с КЗ ротором имеют большие магнитные потери в сравнении с машинами, не содержащими обмотки ротора. Повторяемость результатов обеспечена на 2 машинах 160 габарита с  $2p=4$ ,  $2p=6$ .

#### Литература

1. **Макаров Л.Н.** Основные направления совершенствования низковольтных электродвигателей / Л.Н. Макаров, А.В. Захаров // Известия Академии электротехнических наук РФ выпуск 18, 2016. С.72-80.
2. **ВАКИ.520203.164ПМ** – Программа и методика испытаний экспериментальных образцов синхронных двигателей с анизотропной проводимостью ротора. – ПАО «НИПТИЭМ», 2015.
3. **КГЛИ.657122.013** – Программа и методика предварительных испытаний опытных образцов представителя ряда гребных СЭД с АМПР и статического преобразователя для управления им. – ФГУП «Крыловский государственный научный центр» филиал «ЦНИИ СЭТ», 2015.

УДК 621.313.29

В.А. МАСЛИХИН, инженер,  
Р.В. РОДИОНОВ, к.т.н., доцент

Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт  
электромашиностроения  
600009 г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1  
E-mail: [rodionovrv@mail.ru](mailto:rodionovrv@mail.ru)

### **Разработка контроллера для определения остаточного ресурса электродвигателя**

**Аннотация.** Разработана система диагностики электродвигателя, позволяющая оценивать влияние различных факторов, таких как температура, влажность, вибрация, на ресурс электродвигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, показатели надежности, диагностика, контроллер.

V.A. MASLIKHIN, engineer,  
R.V. RODIONOV, Ph.D., Associate Professor

PJSC «Scientific Research and Design Institute of Technology Electrical Engineering»  
Russia, 600009, Vladimir, Electrozavodskaya street, 1  
E-mail: [rodionovrv@mail.ru](mailto:rodionovrv@mail.ru)

### **Working out of the controller for definition of a residual resource of the electric motor**

**Abstract.** The system of diagnostics of the electric motor is developed, allowing to estimate influence of various factors, such as temperature, humidity, vibration, on an electric motor resource.

**Key words:** the asynchronous motor, reliability indicators, diagnostics, the controller.

В статье рассматриваются вопросы разработки для вспомогательных асинхронных двигателей подвижного состава АНЭ225L4 и АНЭМ225L4. Электродвигатели используются на компрессорах, вентиляторах и в качестве фазорасщепителя электровозов ВЛ85. В течении срока службы электродвигатели подвергаются воздействию внешних факторов (температуры, влажность, вибрация, динамические нагрузки), которые снижают ресурс электродвигателя. В алгоритмах работы контроллера заложены математические модели надежности стержневой обмотки, модель подшипникового узла для роликового и шарикового подшипника [1]. Определение параметров электродвигателей по результатам экспериментальных исследований рассмотрено в [2-4]. Задача расчета ресурса электродвигателя в течении периода эксплуатации является актуальной.

Процессорная плата контроллера выполнена на базе процессора типа Atmel AT91SAM3X8E. На плате задействованы 12 каналов АЦП для подключения первичных преобразователей сигналов, которые установлены в обмотке, коробке выводов, и на корпусе электродвигателя. В обмотке установлены термопреобразователи сопротивления Pt100, отдельно в каждую фазу обмотки, так электродвигатель предназначен для работы при несимметричном питании. На подшипниковых узлах установлены датчики вибрации типа ДВСТ-1-10, обеспечивающие измерение виброскорости. Измеряются токи в каждой фазе и три линейных напряжения на клеммах двигателя. Сопротивление изоляции определяется по датчику тока утечки. Диапазоны измеряемых величин и типы первичных преобразователей приведены в табл. 1.

Таблица. 1.

Физическая величина	Количество датчиков	Диапазон измерения	Точность	Тип датчика	Выходной сигнал датчика
Напряжение	3	0-600В	1,0	LV25-P/SP20	25 мА
Ток	3	0-1000А	1,0	CTSR-0,6	0-1В
Температура	3	-50-+250	0,5	Pt100 или КТУ83	
Виброскорость	2	0-10 мм/с	1,0	ДВСТ-1-10	0-1В
Датчик тока утечки	1	0-10мА	1,5	LV25-P/SP20	25 мА

Контроллер хранит в памяти с привязкой ко внутренним часам реального времени всю информацию о работе электродвигателя, на основании которой определены моменты неисправностей, а также всю информацию, необходимую для принятия решения о гарантийном случае. На рис.1. приведена функциональная схема контроллера. Питание контроллера осуществляется от локомотивной цепи питания вспомогательных устройств. По интерфейсу I2C к процессорной плате подключены периферийные устройства: часы реального времени и двухстрочный дисплей LCD1602. По интерфейсу SPI подключен модуль карты памяти SD. Хранимая информация включает в себя: наработку двигателя

в часах, остаточный ресурс, время воздействия фактора (температура, виброскорость, количество пусков, время пуска, ток утечки), снижающего ресурс (по отдельности и в совокупности при одновременном действии нескольких факторов); результаты опроса датчиков при проведении приемо-сдаточных испытаний. Алгоритмы реализуют корректное определение моментов неисправностей двигателя, а именно моментов наступления:

- критической неисправности (аварийный режим работы),

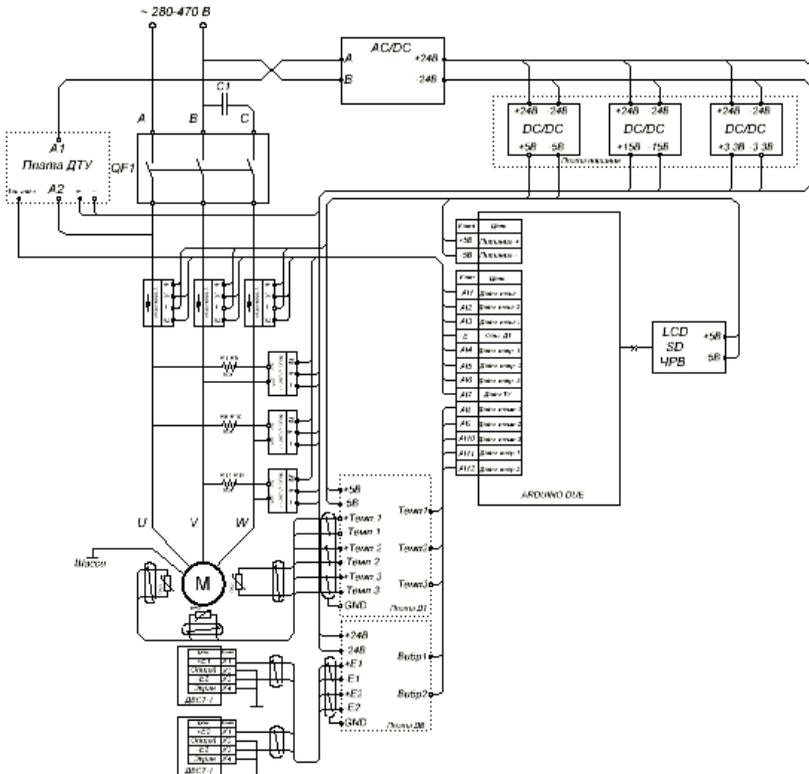


Рис. 1. Функциональная схема контроллера

- не критической неисправности (необходимость оперативного обслуживания). Критическая неисправность двигателя определяется по наступлению хотя бы одного из следующих условий

- повышение вибрации выше допустимой;
- превышение времени запуска более 20 с;
- уменьшение величины сопротивления изоляции ниже допустимой (отдельно для холодного и горячего состояния). Некритическая неисправ-

правность двигателя определяется по наступлению хотя бы одного из следующих условий:

- повышение значения виброскорости выше значения, полученного при проведении приемо-сдаточных испытаний двигателя;

- повышение температуры обмотки выше значения полученного при типовых или периодических испытаниях двигателя.

Разработанный контроллер обеспечивает повышение показателей надежности работы электрических машин локомотивов, увеличения межремонтных пробегов, выполнения ремонта электродвигателя АНЭМ225 по состоянию, а не по пробегу, с целью снижения общих эксплуатационных расходов. Макетный образец контроллера проходит испытания в испытательном центре ПАО «НИПТИЭМ»

### Литература

1. **Гольдберг О.Д.** Надежность электрических машин. Учебник для студ.вышш.учебн. заведений / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская под ред. О.Д. Гольдберга. – М.:Издательский центр «Академия», 2010.- 288с. ISBN 978-5-7695-5739-2

2. **Родионов Р.В.** Исследование динамики тягового электропривода трамвая./ Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения), 27-29 мая 2009г. – Иваново: ИЭГУ. – том 2.

3. **Андреанов М.В., Кругликов О.В., Родионов Р.В.** Идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя по результатам испытаний с учетом требований МЭК 60034-28/ Труды Международного Симпозиума «ЭЛМАШ-2009» МА «Интерэлектромаш», сентябрь, 2009г., Т1, ISBN 978-5-9900026-9-2

4. **Родионов Р.В.** Экспериментальное определение параметров Т-образной схемы замещения насыщенных асинхронных двигателей. // Электротехника, №12, 2011, ISSN 0013-5860

УДК 621.313.332

А.С. ТАБАЧИНСКИЙ, аспирант;  
П.Ю. ГРАЧЕВ, д.т.н., профессор,

Самарский государственный технический университет  
443100 г. Самара, ул. Молодогвардейская 244  
E-mail: tabachinski.as@samgtu.ru, pgrachov@mail.ru

## Инновации гидроагрегатов с интегрированными генераторами для микроГЭС

**Аннотация.** Цель работы – разработка гидроагрегатов микроГЭС с уменьшенной материалоемкостью и повышенными показателями энергоэффективности и надежности мощностью до 100 кВт. В статье обоснована перспективность микроГЭС со встроенными в гидроагрегат генераторами. Управление генераторами осуществляется внешними электронными блоками. Проведена оценка патентно-чистых технических решений, позволяющих повысить эффективность применения таких гидроагрегатов. Конструктивные особенности генераторов

пояснены на примере асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором и электронным управлением, стабилизацию частоты которого осуществляют изменением балластной нагрузки в звене постоянного тока. Напряжением генератора управляют, изменяя его скольжение. Результаты компьютерных экспериментов подтверждают корректность принятых основных методик проектирования инновационных гидрогенераторов с компактными обмотками статора. Они базируются на 3D твердотельном моделировании. Эти методики позволяют учесть особенности расчета сопротивлений ветвей обмоток с изменяющимся сечением и формой.

**Ключевые слова:** инновации, микроГЭС, гидроагрегат, балласт, интегрированный генератор, электронное управление.

A.S. TABACHINSKIY PhD student;  
P.Yu. GRACHEV Doctor of Engineering, professor

Samara State Technical University  
443100 Samara, Molodogvardeiskaya St., 244  
E-mail: [tabachinski.as@samgtu.ru](mailto:tabachinski.as@samgtu.ru), [pgrachov@mail.ru](mailto:pgrachov@mail.ru)

## Innovations for hydro units with integrated generators in micro hydro application

**Abstract.** The aim of the following article is to design hydro units for micro-hydro with reduced material intensity and increased efficiency and reliability up to 100 kW rated power. In this article, perspectives of micro-hydro with integrated generators are explained. External electronics implements the generator control. A new construction of generator is explained on the squirrel-cage induction generator. Frequency control is able due to dead load variation in DC circuit of electronic converter. Innovative compact stator winding has irregular cross-section conductors. Resistance calculation methodic for irregular cross-section winding is illustrated.

**Key words:** innovations, micro hydro, hydro unit, dead load, integrated generator, electronic commutation.

**Особенности конструкции микро-ГЭС с интегрированным генератором.** Наиболее используемой конструкцией микроГЭС на сегодняшний день являются рукавные ГЭС, являющиеся разновидностью деривационных. Их несомненным достоинством является отсутствие плотины и небольшие значения требуемого напора воды. Однако, для передачи механической мощности на вал генератора в рукавных микроГЭС применяется мультипликаторная механическая передача. Использование таких промежуточных звеньев влечёт за собой дополнительные потери, а также дополнительные затраты на обслуживание. По этой причине, авторы предлагают применение интегрированных в гидроагрегат генераторов, в которых ротор жёстко закреплён на шнековой турбине и весь генератор погружен в напорный рукав, с целью охлаждения обмотки статора из провода переменного сечения.

Авторами статьи предлагается усовершенствованная обмотка статора короткозамкнутого асинхронного генератора, позволяющая значи-

тельно увеличить номинальную мощность электрической машины за счёт увеличения коэффициента заполнения медью и значений плотности тока. Двухслойная стержневая волновая обмотка выполняется из провода переменного сечения, в которой площадь поперечного сечения участков соединения пазовых и лобовых проводников составляет  $\frac{2}{3}$  от площади сечения пазовых и лобовых проводников. Данная конструкция позволяет значительно сократить длину лобовых частей и их вылет, что позволяет применять инновационную электрическую машину и в прочих установках возобновляемой энергетики, а также в гибридных автомобилях (рис. 1, 2).

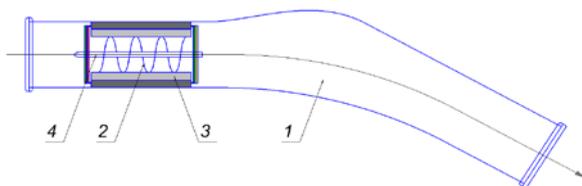


Рис. 1. Эскизная компоновка гидроагрегата микроГЭС с интегрированным асинхронным генератором: 1 – напорный рукав гидроагрегата микро-ГЭС, 2 – шнековая турбина, встроенная в асинхронный гидрогенератор, 3 – ротор интегрированного гидрогенератора с короткозамкнутой обмоткой, 4 – вал гидрогенератора

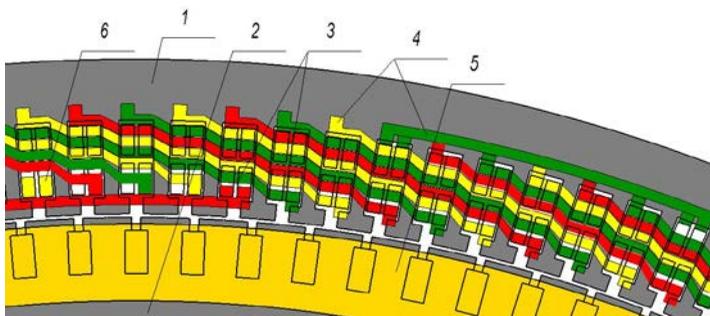


Рис. 2. Сегмент торцевой части инновационной машины: 1 – сердечник статора, 2 – сердечник ротора, 3 – пазы статора, 4 – лобовые части обмотки статора, 5 – короткозамыкающее кольцо, 6 – вывод фазы

Однако уменьшение площади сечения перемычек приводит к увеличению плотности тока и соответственному усложнению теплового режима лобовых участков. Эту проблему предлагается решить за счёт постоянного водяного потока в рукаве микроГЭС, позволив увеличить

плотность тока в активной части обмотки и, соответственно, увеличив номинальную мощность.

**Управление асинхронным гидрогенератором.** Несмотря на то, что энергия потока воды горных рек является намного более стабильной величиной, нежели прочих возобновляемых источников энергии, например, солнца и ветра, для обеспечения потребителей электроэнергией надлежащего качества необходимо стабилизировать напряжение и частоту потребителей переменного тока при изменении нагрузки и скорости водяного потока. Возможно, при вентильном возбуждении АГ от АИН, использовать для этого аккумулятор или буферный накопитель, подобно [3] – рис.3.

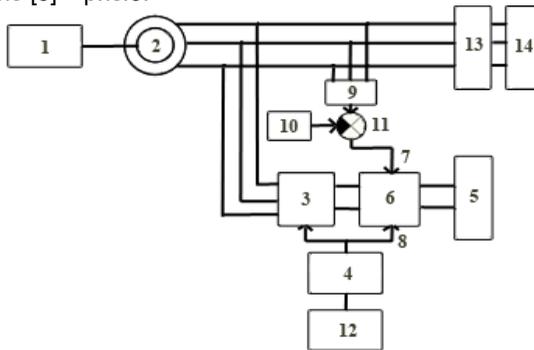


Рис. 3. Блок-схема гидрогенератора с системой стабилизации напряжения и частоты

Здесь, после вентильного возбуждения генератора, изменяют частоту АИН до значения близкого к номинальному. При этом измеряют амплитуду напряжения АГ, сравнивают её с заданным значением, и пропорционально сигналу рассогласования изменяют величину постоянного тока аккумулятора, стабилизируя напряжение переменного тока АГ.

Вал шнековой турбины 1 является валом ротора асинхронного генератора 2, фазы обмотки статора которого подключены к вентильному преобразователю частоты 3 по схеме автономного инвертора напряжения (АИН), выполняющего функции источника реактивной мощности, с задающим генератором 4. Между шинами преобразователя 3 и нагрузкой 5 включен вентильный ШИМ преобразователь 6 с входом управления скважностью импульсов 7 и входом синхронизации 8. Вход датчика напряжения 9 подключен к выходу переменного тока АГ. Выходы датчика 9 и задающего устройства 10 подключены к устройству сравнения 11, выход которого подключен на вход ШИМ преобразователя 7. Датчик интенсивности снижения частоты 12 подключен на вход задающего генератора 4, выход которого включен на вход ШИМ преобразователя 8. Асинхронный вентильный генератор имеет выход постоянного тока с

постоянно-подключенной нагрузкой 5 и выход переменного тока, к которому подключена нагрузка 14 через трёхфазный выключатель 13.

В начале, когда генератор не работает, частота вращения вала ротора максимальна. В заданный момент времени происходит возбуждение генератора 2, которое осуществляется переключением конденсаторов из цепи фаз статора асинхронной машины в узлы искусственной коммутации преобразователя 3, и на выходах генератора появляется напряжение. Вступает в работу преобразователь 6 и отрицательная обратная связь по напряжению (узлы 9-11). Одновременно снижают частоту преобразователя 3, что осуществляют задатчиком интенсивности 12 (интенсивность снижения частоты определяется динамическими свойствами турбины и генератора). При этом уровень отрицательного скольжения асинхронного генератора увеличивается, и для того, чтобы стабилизировать выходное напряжение, отрицательная обратная связь увеличивает ширину импульсов преобразователя 6, поступающих на нагрузку 5, что приводит к увеличению мощности, потребляемой с выхода постоянного тока генератора, снижению частоты вращения вала вследствие зависимости числа оборотов турбины от мощности на валу и снижения отрицательного скольжения генератора до уровня, соответствующего выходному напряжению, близкому к номинальному (задающему). При снижении частоты преобразователя 3 до номинальной, включают выключатель 13, к выходу переменного тока генератора подключается нагрузка 14 и напряжение на выходе переменного тока начинает снижаться. Отрицательная обратная связь действует таким образом, что ширина импульсов на выходе преобразователя 6 уменьшается, что приводит к снижению мощности, потребляемой нагрузкой 5 и увеличению напряжения на выходе переменного тока. После снижения частоты преобразователя 3 до номинальной, она поддерживается постоянной.

#### Литература

1. **Загрядцкий В.И.**, Кобяков Е.Т., Харитонов Л.Г. Проектирование гидромеханического преобразователя микрогидроэлектростанции для низкоскоростных водных источников // Промышленная энергетика. 2015. № 2. С. 55-58.
2. **Грачев П.Ю.**, Костырев М.Л., Кунцевич П.А., Конохов Н.Н. Особенности инновационных проектов ВЭУ и микроГЭС с асинхронными генераторами // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 3 (8). С. 52-56.
3. **Карсаков А.Ю.**, Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е. Перспективные электротехнологии в электромеханической части микро-ГЭС // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии Материалы международной научно-технической конференции : (XVIII Бенардосовские чтения). 2015. С. 132-135.
4. **Инверторный генератор и способ управления таким генератором:** патент на изобретение RUS 2418357 23.07.2009. / Хашимо С., Мурунои К.
5. **Subotic, I.**, Bodo, N. Levi, E. An. EV Drive-Train With Integrated Fast Charging Capability. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, Is. 2, 2015, pp. 1461 – 1473.
6. **Грачев П.Ю.**, Горбачев Е.Е., Табачинский А.С. Перспективы применения инновационных генераторов переменного тока в автономных ВЭУ // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 5 (20). С. 259-264.

7. **Лукутин Б.В.**, Шандарова Е.Б. Качество напряжения микрогидроэлектростанции с вентильной балластной нагрузкой // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 140.
8. **Источник** электропитания: изобретение SU 1473068 A 21.04.1987 / П.Ю. Грачев, А.А. Дружков, Ф.Н. Мягков и др. //Открытия. Изобретения. 1988. №22.
9. **Энергоэффективная** электрическая машина: патент на изобретение RUS 2526835 03.08.2012 / П.Ю. Грачев, Е.Е. Горбачев
10. **Экономичная** двухслойная обмотка электрической машины: патент на изобретение RUS 2568186 12.03.2014 / Грачев П.Ю., Макаров Д.В., Горшков Р.Г., Карсаков А.Ю.
11. **Энергоэффективная** электрическая машина с компактными лобовыми частями: патент на изобретение RUS 2602511 10.08.2015 / П.Ю. Грачев, Е.Е. Горбачев, Е.В. Стрижакова
12. **Грачев П.Ю.**, Ежова Е.В., Горбачев Е.Е., Макаров Д.В. Управляемый электродвигатель для силовой установки летательного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 225-231.
13. **Беспалов В.Я.**, Красовский А.Б., Панихин М.В., Фисенко В.Г. Исследование многополюсного асинхронного тягового частотно-регулируемого двигателя // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 5. С. 295-307.
14. Горбачев Е.Е., Грачев П.Ю. Особенности проектирования энергоэффективных асинхронных машин с нетрадиционным электромагнитным ядром // В сборнике: проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: материалы международной научно-технической конференции. 2015. С. 47-50.
15. **Грачев П.Ю.**, Горбачев Е.Е., Макаров Д.В. Энергоэффективные электрические машины с компактными лобовыми частями обмоток // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 5. С. 47-51.
16. **Grachev, P.Yu.**, Gorbachev, E.E. Tabachinskiy, A.S. Power Converters with Compact Winding SCIGs for HEVs, Micro Hydroelectric Power Stations and Wind Turbines. International Conference Industrial Engineering (ICIE-2016). Sec. 4, no. 44.

УДК 621.313.333.2

Н.Р. САФИН<sup>1</sup>, ассистент, В.А. ПРАХТ, к.т.н., доцент,  
В.А. ДМИТРИЕВСКИЙ, к.т.н., доцент  
Уральский федеральный университет  
620002 г. Екатеринбург, ул. Мира 19  
E-mail: safinnail89@mail.ru

## **Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором**

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы разработки методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, исследуется возможность диагностики износа подшипников и межвитковых замыканий по спектральному составу токов статора.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, диагностика, износ подшипников, межвитковое замыкание, спектральный состав.

N.R. SAFIN assistant, V.A. PRAKHT PhD, associate professor,  
V.A. DMITRIEVSKII PhD, associate professor  
Ural Federal University,  
620002 Yekaterinburg, Mira St., 19  
E-mail: safinnail89@mail.ru

## Development of diagnosis method based on stator currents for squirrel-cage induction motors

**Abstract.** The paper deals with diagnosis issues of squirrel-cage induction motors by analysis of stator currents, as part of investigation the possibilities for diagnosis bearing wear and short-circuits by spectral content of stator currents.

**Key words:** induction motor, diagnosis, bearing wear, short-circuit, spectral content.

Оценка технического состояния АД представляет собой важную задачу, решение которой способствует повышению надежности, снижению аварийных ситуаций, сокращению расходов и потерь рабочего времени, связанных с внеплановыми ремонтами оборудования и технологическими неполадками.

В ряде эксплуатационных условиях использование методов, основанных на вибродиагностике может быть нецелесообразным, либо оборудование может находиться в труднодоступном месте, в таком случае методика токовой диагностики является альтернативным вариантом, позволяющим выполнить диагностическое обследование без вмешательства в нормальную работу двигателя.

Основные отказы АД происходят в обмотке и в подшипниках, соотношение между ними зависит от условий эксплуатации, типа, мощности и частоты вращения ротора.

Основным и надежным признаком износа подшипников двигателя в спектре тока является модуляция тока статора частотой вращения ротора  $fr$ . При повреждении подшипников или нарушении центровки валов двигателя, момент сопротивления, воздействующий на вал двигателя, периодически изменяется с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Периодическое изменение момента сопротивления вызывает появление в токе статора двигателя составляющих с частотой, пропорциональной частоте вращения вала ( $f_1 - fr$ ) и ( $f_1 + fr$ ) [1].

В работе [2] отмечается, что при наличии эксцентриситета в воздушном зазоре дополнительно возникают гармоники проводимости, определяемые разложением проводимости неравномерного зазора в ряд Фурье. При эксцентриситете в воздушном зазоре возникают гармоники порядка  $p \pm 1$ , обусловленные составляющими магнитной проводимости. Вместе с этим, при эксцентриситете в воздушном зазоре дополнительно присутствуют гармоники с числом пар полюсов  $p \pm k$  (где  $k = 1, 2, 3 \dots$ ) и порядком  $v = 1 \pm k/p$ , обусловленные периодическими изменениями магнитной проводимости. В обмотке статора данные гармоники

наводят составляющие ЭДС с частотой вращения ротора ввиду того, что магнитная проводимость воздушного зазора, обусловленная механической неисправностью, изменяется с частотой вращения ротора  $f_r$ .

С эксплуатацией механических дефект приводит к увеличению ряда пространственных гармоник в зазоре машины. Наиболее выраженными колебательными силами являются зубцовые гармоники статора и ротора. При допущении, что при износе подшипников зубцовая гармоника ротора  $1 \pm kZr/p$  вследствие эксцентриситета напрямую взаимодействует с изменениями магнитной проводимости в неравномерном воздушном зазоре, предположим, что впоследствии приводит к увеличению только данной пространственной гармоники.

Износ подшипников способствует увеличению степени эксцентриситета, что приводит к периодическому изменению магнитной проводимости воздушного зазора, и впоследствии к изменению гармонического состава магнитной индукции в воздушном зазоре и потребляемых токов статора. Приведем предполагаемые диагностические признаки при работе АД с износом подшипников: составляющие  $f_1 \pm vfr$ , обусловленные модуляцией тока и частотой вращения ротора; составляющие  $f_r(1 \pm k/p)$ , обусловленные периодическим изменением магнитной проводимости воздушного зазора вследствие эксцентриситета; составляющие  $f_r(1 \pm k/p \pm kZr/p)$ , обусловленные периодическим взаимодействием зубцовых гармоник ротора с изменениями магнитной проводимости воздушного зазора вследствие эксцентриситета.

Соответственно можно уточнить, что в выражении  $f_1 \pm vfr$ , первая составляющая является основной гармоникой питающей сети  $f_1$ , вторые составляющие модулируются вследствие неисправности. Преобразование Гильберта позволяет получить огибающие осциллограмм токов и их спектры, содержащие амплитудно-модулированные колебания с отсутствием доминирующей составляющей  $f_1$ . В данной работе рассмотрен ряд типоразмеров АД с числом пар полюсов  $2p=2$  соответственно, частота вращения ротора которых приблизительно равна частоте питающей сети  $f_r \approx f_1$ . Исходя из этого, в спектре огибающих осциллограмм токов следует анализировать следующие амплитудно-модулированные колебания составляющих токов при работе АД с износом подшипников:  $vfr$ ,  $f_r k/p$  и  $f_r(k/p \pm kZr/p)$ .

В этой работе полагается, что при анализе спектра тока, гармонические составляющие, вызванные неисправностями, следует сопоставлять с доминирующей гармоникой. В спектре тока на основе огибающей осциллограммы доминирующая гармоника  $IDC$  - частота  $f_0 = 0$  Гц, т.к. оператор Гильберта имеет функцию  $h(t) = 1/\pi t$ . Соответственно амплитудно-модулированные колебания, вызванные износом подшипников, следует сопоставлять с доминирующей гармоникой, в данном случае  $f_0$  на частоте 0 Гц.

Анализ огибающих осциллограмм токов выполняют с полосой пропускания до максимальных амплитудно-модулированных колебаний.

Вследствие анализа только амплитудно-модулированных колебаний без основной составляющей тока спектр огибающей осциллограммы тока следует выполнять в линейном масштабе (А/Гц), что способствует определенному повышению разборчивости при графическом анализе в зависимости от логарифмического масштаба (дВ/Гц).

Режим работы АД с межвитковым замыканием характеризуется увеличением значением фазных токов. С ростом степени несимметрии обмотки статора дополнительные гармоники МДС увеличиваются, помимо нечетных гармоник порядков, определяемых  $\nu = 6 \cdot \pm 1$ , вследствие неисправности дополнительно возникают гармоники МДС четного (для АД с  $2p=2$ ) и дробного порядков (для АД с  $2p=4$ ) [3]. В работе рассмотрены АД с  $2p=2$  и предполагается, что целесообразно учитывать только нечетные и четные гармоники.

Вместе с этим, возникновение несимметрии обмотки статора не всегда приводит к увеличению амплитуд всех нечетных гармоник, что также возможно обусловлено мгновенным изменением значений индуктивностей от каждого положения ротора относительно статора. При симметричной обмотке статора токи в обмотках имеют форму, приближенную к синусоидальной, и, как следствие, постоянная составляющая отсутствует. При несимметрии обмотки статора, вызванной межвитковым замыканием, токи в обмотках отклоняются от синусоидальной формы. Появляются четные гармоники ввиду появления постоянной составляющей фазных токов. Для диагностирования межвитковых замыканий в АД с  $2p=2$  по спектрам токов необходимо проанализировать четные гармоники низших порядков  $\nu = 2 \div 10$  ввиду их наибольших амплитуд и, как следствие, более чувствительных к межвитковым замыканиям по сравнению с гармониками высоких порядков.

Ввиду того, что основным признаком неисправности обмотки статора АД является модуляция тока частотой питающей сети  $f_1$ , при диагностировании межвитковых замыканий исследуется спектр на основе исходной осциллограммы тока. При этом спектр тока следует выполнять в логарифмическом масштабе (дВ/Гц) вследствие доминирующей составляющей тока на частоте питающей сети  $f_1$ .

В целях экспериментального исследования установленных диагностических признаков неисправностей АД был разработан стенд, который позволяет проводить сравнительные испытания АД мощностью  $0,55 \div 1,5$  кВт. При экспериментальных исследованиях неисправные подшипники поочередно устанавливались со стороны привода (передняя часть). На рис. 1 следует отметить, что при работе АД с неисправным подшипником происходит увеличение амплитуд частот амплитудно-модулированных колебаний  $\nu fr$ .

При испытаниях АД с межвитковым замыканием были проведены с каждым АД в режимах: с симметричной обмоткой; с замыканием 2 витков, 4 витков, и 6 витков.

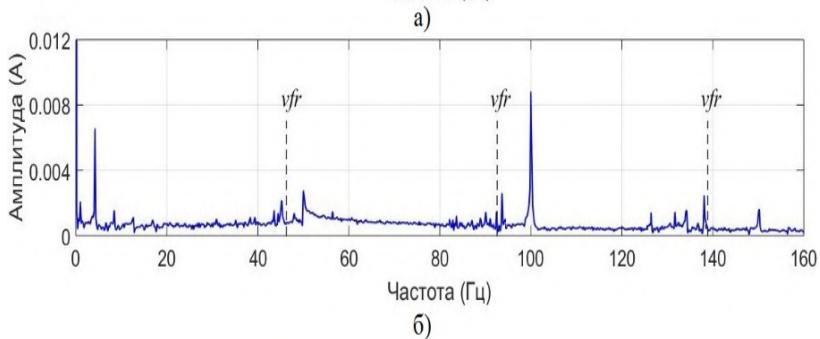
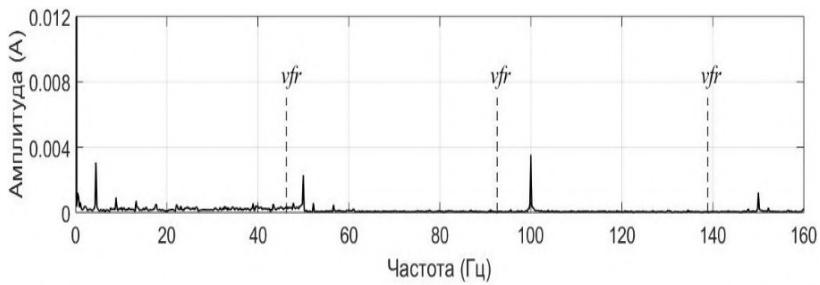


Рис. 1. Спектральный состав огибающих осциллограмм токов статора:  
 а) АИР63В2 при работе в исправном состоянии;  
 б) АИР63В2 при работе с неисправным подшипником

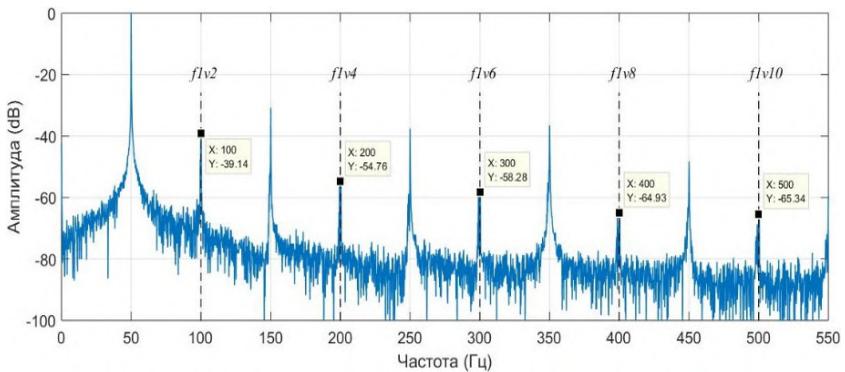


Рис. 2. Спектральный состав обобщенного вектора тока: АДМ80А2 с замыканием 4 витков

На рис. 2 представлен спектральный состав обобщенного вектора тока при работе АД с замыканием 4 витков. В этом режиме имеется существенный рост четных гармоник  $f1v2 \div 10$ , среди которых гармоника  $f1v2$  превышает значение -40 dB, и гармоники  $f1v4$  и  $f1v6$  превышают значение -60 dB.

В работе были проведены экспериментальные исследования АД и проанализированы отмеченные диагностические признаки при возникновении износа подшипников и межвитковых замыканий.

По результатам экспериментальных исследований было отмечено, что несимметрия обмотки статора, вызванная межвитковым замыканием, приводит к возникновению дополнительных высших гармоник, в частности четных гармоник низших порядков в АД с  $2p=2$ . Методика диагностирования межвитковых замыканий основывается на спектральном анализе обобщенного вектора тока статора, с сопоставлением четных гармоник низших порядков  $f1v2 \div 10$  с амплитудой основной гармоники  $f1$  питающей сети в логарифмическом масштабе dB/Гц; обосновано, что износ подшипников приводит к возникновению дополнительных высших гармоник, обусловленных модуляцией тока частотой вращения ротора  $v/r$ , периодическим изменением магнитной проводимости воздушного зазора вследствие эксцентриситета  $frk/p$ , периодическим взаимодействием зубцовых гармоник ротора с изменениями магнитной проводимости воздушного зазора вследствие эксцентриситета  $fr(k/p \pm kZr/p)$ . Методика диагностирования износа подшипников заключается в спектральном анализе огибающей обобщенного вектора тока статора с сопоставлением суммы амплитудно-модулированных гармоник  $I\Sigma am$  с амплитудой постоянной составляющей спектра  $IDC$  в линейном масштабе A/Гц.

### Литература

1. Булычев А.В. Метод контроля состояния механической части асинхронного электродвигателя / А.В. Булычев, В.К. Ванин // Электротехника. – 1997. – № 10. – С. 5-9.
2. Никиян Н.Г. Многофазная реальная асинхронная машина: математическое моделирование, методы и средства диагностики: монография / Н.Г. Никиян. - Оренбург: Изд-во ОГУ, 2003. - 334 с.
3. Никиян Н.Г. Вращающий момент трехфазной асинхронной машины при несимметрии фазных обмоток статора / Н.Г. Никиян, А.С. Падеев, А.Б. Омон // Электричество. – 2008. – № 2. – С. 49-54.

УДК 621.313.333

А.И. ИЗОТОВ, к.т.н., заведующий кафедрой;  
С.А. ИЗОТОВ, к.т.н., доцент; А.А. ФОМИНЫХ, к.т.н., доцент;  
В.Н. ТИМОШЕНКО, ассистент;  
Д.В. СОБОЛЕВ, магистрант  
Вятский государственный университет  
610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36  
*E-mail: fad.fnv@gmail.com*

## **Способ снижения износа узлов трения в электрических машинах за счет использования нанотехнологий**

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность применения смазывающей щетки на основе дисульфида молибдена, которая позволяет снизить износ электрических щеток и контактных колец, а также повысить стабильность работы электрического контакта.

**Ключевые слова:** электрические щетки; контактное кольцо; дисульфид молибдена; смазывающая щетка; износ.

A.I. IZOTOV, c. t. s., head of department;  
S.A. IZOTOV, c. t. s., docent;  
A.A. FOMINYKH, c. t. s., docent;  
V. N. TIMOSHENKO, teaching assistant;  
D.V. SOBOLEV, undergraduate student

Vyatka State University  
610000 Kirov, Moskovskaya St., 36  
*E-mail: fad.fnv@gmail.com*

## **The method of reducing the wear of friction units in electric machines due to the use of nanotechnology**

**Abstract.** The article discusses the possibility of applying a lubricating brushes on the basis of molybdenum disulfide, which reduces the amount of wear of electrical brushes and slip rings, and to improve the stability of electrical contact.

**Keywords:** electric brushes; contact ring; molybdenum disulphide; lubricating brush; wear.

Во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства широкое распространение нашли узлы скользящего токосъема (УСТ), состоящие из вращающихся контактных поверхностей и скользящих по ним электрических щеток (ЭЩ). Такие узлы используются в турбогенераторах, на железнодорожном транспорте (электровозы, электроподвижной состав метрополитена, электропоезда постоянного и переменного тока), в электрическом приводе ручного инструмента, электрических двигателях авиационного исполнения и в других случаях.

Несмотря на то, что сегодня существует тенденция к переходу на бесконтактные электрические машины, одним из наиболее распростра-

ненных электромеханических преобразователей энергии до сих пор являются машины, оснащенные системами скользящего токосъема. Это коллекторные машины постоянного и переменного тока, синхронные, асинхронные машины с фазным ротором и др. Связано это с имеющимися у них некоторыми преимуществами перед бесконтактными машинами, такими как дешевизна и изученность конструкций самих машин.

Основными функциями узла скользящего токосъема являются: отвод или подача рабочих токов, отвод токов статического электричества, а также «паразитных» токов.

Долговечность работы коллекторных машин постоянного и переменного тока в большинстве случаев определяется временем безотказной работы щеточно-коллекторного узла, которое в значительной степени зависит от скорости износа контактных пар.

Работа этих узлов сопровождается износом пар трения, что приводит к расходу контактных материалов, требует от обслуживающего персонала периодического контроля, обслуживания и ремонта, а в некоторых случаях определяет надежность всего оборудования, когда быстрая замена элементов контактной пары невозможна по условиям эксплуатации.

Именно непрерывно изнашивающиеся ЭЩ определяют ресурс работы электрической машины, т.к. являются наименее долговечными элементами при эксплуатации. Известно, что до 60% отказов электродвигателей связано с неудовлетворительной работой УСТ, из которых примерно 15-30% отказов связано с большим износом электрических щеток. В результате, значительное количество выпускаемых агрегатов требует технологических доработок. Кроме того, некоторые изделия оснащаются 3-5 комплектами ЭЩ при выпуске с завода. Особенно это касается электромеханических преобразователей энергии, работающих в повторно-кратковременных режимах с большими бросками пусковых токов.

Проблемы в узле скользящего токосъема также связаны с условиями его эксплуатации: климат, состав атмосферы и т.д., что в значительной степени также снижают их ресурс.

Кафедрой ЭМА ВятГУ предложено решение этой проблемы за счет нанесения на поверхность коллектора, контактного кольца (КК) смазочного наноразмерного покрытия, позволяющего улучшить характеристики контактных пар трения (электрическая щетка и металлический коллектор или кольцо) за счет снижения их износов, а также повышения стабильности работы электрического контакта. Повышение стабильности электрического контакта в коллекторных машинах переменного тока проявляется в снижении уровня радиопомех по мощности и напряжению, при одновременном снижении износа ЭЩ и коллекторов [1].

Предлагаемые способ снижения износов ЭЩ, КК и коллекторов реализуется за счет установки на коллектор смазывающих нетокопроводящих

дящих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена (ДМ), при этом на две электрические щетки устанавливается одна смазывающая щетка (СЩ) согласно рис. 1.

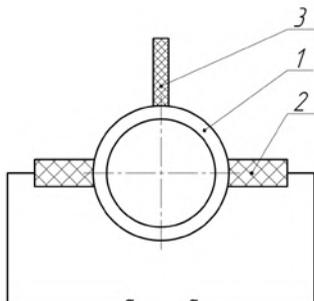


Рис. 1. Способ установки смазывающей щетки, изготовленной на основе дисульфида молибдена: 1 – контактное кольцо (КК) или коллектор, 2 – электрическая щетка (ЭЩ), 3 – смазывающая щетка (СЩ)

Дополнительная смазывающая щетка, изготовленная на основе дисульфида молибдена, наносит на коллектор смазывающий слой, уменьшающий коэффициент трения пары ЭЩ-КК или коллектор. Уменьшение износа щеток тем эффективнее, чем тверже материал коллектора.

Данное техническое решение защищено авторскими свидетельствами и патентом. Разработана промышленная технология изготовления смазывающих щеток, а также утверждены технические условия на поставку.

Применение смазывающей щетки в коллекторных двигателях авиационного исполнения мощностью 6; 40; 60 Вт позволило снизить износы штатных щеток при различных климатических условиях от 5 ( $t=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $r=15\text{ мм. рт. ст.}$ ) до 7 раз ( $t=-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $r=15\text{ мм. рт. ст.}$ ). Проведен широкий спектр работ по оценке влияния материала коллектора (медь М1, хромовая бронза, кадмиевая бронза), разных марок ЭЩ, условий и времени хранения двигателей, оборудованных СЩ. Эффективность разработки подтверждена актами промышленных испытаний [2].

Испытания двигателей в высоком вакууме ( $10^{-6} \dots 10^{-5}\text{ мм. рт. ст.}$ ) в ракетно-космической корпорации «Энергия» в сочетании с положительными и отрицательными температурами с использованием инновационного решения показали существенное снижение износа штатных ЭЩ.

Результаты работы были рассмотрены на заседании технического совета местного электромашиностроительного предприятия (г. Киров) и было принято решение о внедрении результатов разработки в серийное производство.

Инновационное решение, применительно к КК скользящего узла турбогенераторов, приводит к повышению его эксплуатационной

надежности за счет снижения неравномерности распределения тока по параллельно работающим ЭЩ, снижению температуры КК, уменьшению износа щеток более чем в 3 раза.

Предлагаемая инновационная разработка имеет преимущества по сравнению с существующей технологией введения в состав порошка ДМС-140:

1. Щетка из дисульфида молибдена имеет низкую степень износа в процессе эксплуатации и может использоваться практически до полного истирания в отличие от ЭЩ, в составе которой имеется ДМ, где износ ограничивается высотой заделки токоведущего канатика.

2. Инновационная технология позволяет использовать ДМ с широким диапазоном дисперсности 1-140 мкм. Кроме того, за счет изменения давления на СЩ можно получить на коллекторе (КК) оптимальную по толщине смазывающую нанопленку, обеспечивающую износ токовых щеток.

3. Износ электрических щеток при применении данной технологии более чем в 3 раза ниже, чем износ ЭЩ в состав которых входит ДМС-140.

4. В настоящее время, использование технологии с введением ДМС-140 в щеточную массу ЭЩ невозможно, т.к. отсутствует действующее производство в Российской Федерации.

5. Инновационное решение позволяет улучшать износные характеристики любых существующих ЭЩ, без изменения технологии их производства.

6. Было обнаружено, что при использовании технологии непосредственного внедрения ДМ в щеточную массу, при искрении под сбегającym краем токоведущей щетки от  $1 \frac{1}{2}$  и выше (когда наряду с тепловым искрением появляется дуговое), ДМ имеющийся в сбегающем крае токоведущей щетки под действием дугового искрения переходит в оксид и вызывает повышенный износ поверхности коллекторов при относительно малом износе поверхности щеток.

#### Литература

1. **Изотов А.И., Мамаев Г.А., Беспалов В.Я., Никулин С.В., Тимошенко В.Н.** Улучшение характеристик электрических машин за счёт применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена. – Электротехника. 2007. №6. – 2007, с. 33а-39.
2. **Изотов А.И., Мамаев Г.А., Беспалов В.Я., Фоминых А.А., Новиков Л.И., Никулин С.В., Изотов С.А.** Применение смазывающих щеток для снижения износа элементов узлов скользящего токосъема в электрических машинах. – Электричество. 2015. №3. – 2015, с. 53-57.

УДК 621.313

А.А. ФОМИНЫХ<sup>1</sup>, к.т.н., доцент; А.И. ИЗОТОВ, к.т.н., зав.каф.;  
С.В. НИКУЛИН, к.т.н., доцент, и.о. проректора по образованию;  
Д.К. ПРОКОШЕВ, старший преподаватель;  
Н.Д. КОХАНЧУК, магистрант;  
А.С. ГУСЕВ, магистрант  
Вятский государственный университет  
610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36  
E-mail: aa\_fominyh@vyatsu.ru<sup>1</sup>

### **Особенности работы узлов скользящего токосъема электрических машин при отсутствии токовой нагрузки**

**Аннотация.** Рассмотрена работа узлов скользящего токосъема электрических машин для случая, когда на электрических щетках отсутствуют рабочие токи. Представлены результаты исследований.

**Ключевые слова:** узел скользящего токосъема, электрическая щетка, контактное кольцо, смазывающая щетка, износ

A.A. FOMINYKH, candidate of engineering sciences, associate professor;  
A.I. IZOTOV, candidate of engineering sciences, head of department;  
S.V. NIKULIN, candidate of engineering sciences, vice-rector for education;  
D. K. PROKOSHEV, senior lecturer; N.D. KOKHANCHUK, magstrand;  
A.S. GUSEV, magstrand

Vyatka State University  
36, Moskovskaya street, Kirov city, Kirov region, 610000, Russian Federation  
E-mail: aa\_fominyh@vyatsu.ru<sup>1</sup>

### **The features of nodes moving current collection of electrical machines under no-load under current**

**Abstract.** The article describes the work units moving current collector electric machines for the case when the electric brushes are no operating currents. The results of studies evaluating the impact of material slip rings for wear regular electric brushes.

**Key words:** unit sliding current collectors, electric brush, slip rings, lubricants brush, wear

Широкое применение в различных отраслях промышленности находят узлы скользящего токосъема (УСТ), работающие при отсутствии токовой нагрузки. Такой режим функционирования контактных пар характерен для узлов снятия потенциала подвижного состава электропоездов и электровозов, систем снятия статического электричества синхронных турбо- и гидрогенераторов, а также в случае работы турбоагрегатов в режиме разбега турбины, когда на штатных электрических щетках (ШЩ) отсутствуют рабочие токи. Особенностью их функционирования является повышенный износ пар трения щетка - контактная поверхность. Причина высоких износов может быть обусловлена неоп-

тимальным подбором материалов контактных поверхностей, а также условиями и режимами работы (повышенные вибрации, высокие температуры, агрессивная среда и т.д.), что активно влияет на способность образования на поверхности коллекторов, контактных колец политурной пленки («политуры»), которая значительно снижает коэффициент трения взаимно перемещающихся поверхностей. [1]

Задача наших исследований состояла в том, чтобы оценить влияние материала щеток, контактных колец (КК) и смазывающих щеток (СЩ), выполненных на основе дисульфида молибдена, на износ электрических щеток узлов скользящего токосъема, работающих при отсутствии токовой нагрузки.

Для оценки влияния материала контактных колец на износ электрических щеток был разработан и проведен монтаж 6 установок на базе одноякорного преобразователя ПО – 250 А, выпускаемого АО «Электромашиностроительный завод «ЛЕПСЕ», с материалами контактных колец: сталь 12Х18Н10Т, чугун СЧ-18, латунь Л63, бронза БрХ08.

Каждое кольцо оборудовано двумя штатными щеткодержателями, предназначенными для установки электрических щеток, а также дополнительным щеткодержателем для смазывающей щетки, выполненной на основе дисульфида молибдена (рис. 1).

Тангенциальный размер смазывающей щетки составлял 1/2 соответствующего размера одной ШЩ. Аксиальный размер щеток одинаков.

В процессе проведения исследований измерялся износ щеток и сопротивление политурной пленки [4].

Стабильность износов и сопротивления политурной пленки во времени контролировалась показателем среднего квадратичного отклонения

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2},$$

где  $n$  – объем выборки;  $x_i$  – значение  $i$ -го элемента выборки;

$x_{\text{ср}}$  – среднее арифметическое выборки.

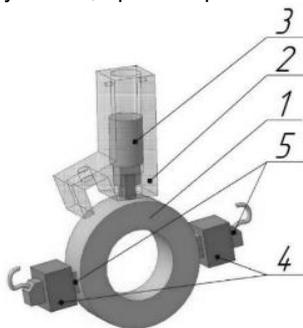


Рис. 1 - Модернизированный щеточно-контактный узел преобразователя ПО-250 А (1 – контактное кольцо, 2 – дополнительный щеткодержатель под смазывающую щетку, 3 – смазывающая щётка, 4 – штатный щеткодержатель, 5 – испытываемые щетки)

В табл. 1 представлены усредненные результаты исследований по влиянию материала контактных колец (бронза, сталь, чугун, латунь) на износ ШЩ при работе в обесточенном состоянии, из которых видно, что наибольшие износы наблюдались в случае их работы на КК из латуни. Наименьшие износы ШЩ имели машины со стальными и чугунными КК. Наряду с этим использование стальных КК позволяет получить более стабильные значения износов ШЩ во времени: среднее квадратичное отклонение износов ( $\sigma h$ ) составляет 0,006. При оценке стабильности сопротивления политурной плёнки наилучшие показатели наблюдаются у латунного КК (среднее квадратичное отклонение сопротивления пленки  $\sigma R$  равно 0,055).

**Табл. 1. Оценка влияния материала колец на износ электрических щеток МГС-7 при частоте вращения 11 500 об/мин**

Материал КК	Средняя интенсивность износов ЭЩ, мкм/км	Коэффициент наглядности износов ЭЩ, о.е.	Сопротивление пленки, Ом	Среднее квадратичное отклонение износов/сопротивления политурной пленки, $\sigma h/\sigma R$
Бронза	0,107	0,419	0,264	0,013/0,092
Сталь	0,083	0,325	4,225	0,006/1,276
Чугун	0,085	0,335	4,575	0,017/1,73
Латунь	0,254	1,0	0,236	0,026/0,055

В дальнейшем были проведены опыты по оценке влияния смазывающих щеток, выполненных из дисульфида молибдена (ДМ) на снижение износов штатных щёток. Применение СЩ на частоте вращения 11 500 об/мин привело к увеличению износов штатных щеток. Наблюдаемый повышенный износ ШЩ, как показали проведенные нами расчеты, обусловлен высокими значениями микротемпературы в зоне контакта щетка – кольцо, превышающими 400°С [5]. Это приводит к переходу ДМ в оксид и появлению в зоне контакта абразивных частиц. В соответствии с проведенными исследованиями был найден рабочий диапазон частот вращения, при котором температура в зоне точек непосредственного контакта не превышала 400°С, и проведена серия повторных испытаний с использованием щеток марок ЭГ – 4, ЭГ – 2 А, применяемых в узлах заземления валопровода турбогенератора, ЭГ – 61 А, МГС – 7 используемые в узлах снятия потенциалов электроподвижного состава железнодорожного транспорта. Результаты представлены в табл. 2.

Табл. 2. Оценка влияния установки смазывающих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена на износ щеток в диапазоне частот вращения

Материал ЭЩ (КК)	Средняя интенсивность износов ЭЩ мкм/км		Эффективность снижения износов ЭЩ, о.е.
	СЩ отсутствуют	СЩ установлены	
ЭГ-61 А (сталь)	0,054	0,025	2,15
МГС-7 (сталь)	0,083	0,043	1,95
ЭГ-2А (сталь)	0,062	0,027	2,28
ЭГ-4 (сталь)	0,046	0,018	2,61

Наименьшие износы при отсутствии СЩ наблюдались в случае применения щеток ЭГ-4. Наибольшие – в случае применения щёток МГС-7.

Применение СЩ, наряду со снижением износов ШЩ, привело к значительному увеличению равномерности их износов во времени. В таблице 3 представлены результаты исследования нестабильности износов ШЩ ЭГ – 61 А во времени, работающих на стальном кольце и их зависимость от использования СЩ.

Таблица 3. Влияние СЩ на стабильность износов ШЩ

Параметры режима	Длительность наработки, ч						
	30	60	90	120	150	180	210
Материал КК	Сталь						
Материал электрической щетки	ЭГ – 61 А						
Удельное давление, кПа	50						
Износы, мкм/км	$\frac{0,015}{0,008}$	$\frac{0,009}{0,007}$	$\frac{0,018}{0,008}$	$\frac{0,013}{0,009}$	$\frac{0,016}{0,008}$	$\frac{0,009}{0,008}$	$\frac{0,018}{0,008}$
Среднее значение износов ШЩ, мкм./км	0,014 0,008						

Примечание: в числителе указан уровень износов без СЩ, в знаменателе – в случае их применения

В случае отсутствия СЩ износы ШЩ носят нестабильный характер на протяжении всего эксперимента (максимальное отклонение от среднего значения износов ШЩ составляет 36 %. Наблюдаемое явление, по всей вероятности, обусловлено нестабильностью дуги контактирования щетка-кольцо, которая по данным [6] может значительно отличаться от кажущейся. Установка СЩ (рис. 2) приводит к снижению неравномерности износов ШЩ. Максимальное отклонение от среднего значения износов ШЩ в случае использования СЩ составило 12,5 %. Наблюдаемый эффект можно объяснить влиянием смазки на стабилизацию дуги контактирования.

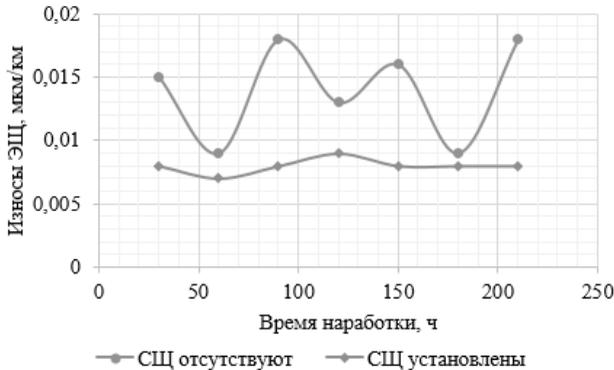


Рис. 2. Влияние установки СЦ на стабильность износов ЭЩ ЭГ – 61 А

По результатам исследований созданы 4 математические модели износов электрических щеток марок ЭГ-61 А и МГС-7 первого порядка в случае работы на стальных кольцах и отсутствии токовой нагрузки, которые позволяют прогнозировать износы щеток на стадии проектирования и эксплуатации.

Полиномы износов имеют следующий вид:

– для щеток МГС --7 (смазывающие щетки отсутствуют):

$$I_h = 0,0758 + 0,0092 \cdot x_1 + 0,0056 \cdot x_2 + 0,0051 \cdot x_3,$$

где  $x_1$  – коэффициент, определяемый частотой вращения;

$x_2$  – коэффициент, определяемый удельным давлением пружин;

$x_3$  – коэффициент, определяемый шириной щетки.

– для щетки ЭГ-61 А (смазывающие щетки отсутствуют):

$$I_h = 0,0488 + 0,0046 \cdot x_1 + 0,0067 \cdot x_2 + 0,0022 \cdot x_3,$$

– для щетки МГС-7 (смазывающие щетки установлены):

$$I_h = 0,0392 + 0,0046 \cdot x_1 + 0,0036 \cdot x_2 + 0,0048 \cdot x_3 + 0,0049 \cdot x_4 + 0,0009 \cdot x_3 \cdot x_4,$$

где  $x_4$  – коэффициент, определяемый толщиной смазывающего покрытия;

$x_3 \cdot x_4$  – коэффициент, учитывающий взаимное влияние ширины щетки и толщины смазки.

– для щетки ЭГ-61 А (смазывающие щетки установлены):

$$I_h = 0,0239 + 0,002 \cdot x_1 + 0,0027 \cdot x_2 + 0,0008 \cdot x_3 + 0,0027 \cdot x_4,$$

Достоверность разработанных моделей была проверена в ходе промышленных испытаний совместно с представителями АО «Электромашиностроительный завод «ЛЕПСЕ» (г. Киров). Результаты иссле-

дований совпадают с математическими ожиданиями, полученными по расчетным моделям с погрешностью, не превышающей 10 %. Установка смазывающих щеток при работе на стальных кольцах в случае отсутствия токовой нагрузки позволяет снизить износы штатных электрических щеток МГС-7 в 2,1 раза, ЭГ-61 А – в 2,4 раза. Результаты исследований, а также достоверность разработанных моделей подтверждены двумя актами промышленных испытаний.

#### **Выводы:**

Минимальные износы щёток обеспечивает контактная пара щётка ЭГ-4 – стальное кольцо, наибольшее сопротивление политурной плёнки – кольца, изготовленные из чугуна.

Применение смазывающих щёток позволяет уменьшить износы штатных щёток более чем в два раза с увеличением равномерности их износа во времени.

Созданы физические модели, позволяющие на стадии проектирования и эксплуатации прогнозировать износы щёток ЭГ-61А и МГС-7 при работе на стальном кольце в сочетании со смазывающими щётками.

#### **Литература**

1. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин М. Энергия, 1974. – 321 с.
2. Пат. 2162261 Российская федерация, МПК Н 01 R 39/00, Н 01 R 39/40 Узел скользящего токосъема электрических машин / Изотов А.И. - № 99117107/09; заявл. 04.08.99; опубл. 20.01.01, Бюл. № 16. – 3 с.
3. Пат. 112513 Российская федерация, МПК Н 01 R 39/00. Узел скользящего токосъема (варианты) / Изотов А.И. - № 2011120198/07; заявл. 19.05.11; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 8 с.
4. Патент СССР, МКИ5 H01R30 00 А.С. №1468346. Способ определения времени формирования политурной плёнки на коллекторе электрической машины / Изотов А.И.; 1988 г.
5. Плохов И.В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния УСТ турбогенераторов: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. С. – Петербург. гос. техн. ун-т, Санкт–Петербург, 2002. – 36 с.
6. Деева В.С., Слободян М.С., Слободян С.М. «Живучесть» щеточного контакта электрических машин // Электричество. – 2013. – № 04. – С. 45-49.

УДК 621.313

Э.Л. ГРЕКОВ, к.т.н., доцент; М.П. САЛИКОВ, к.т.н., доцент;  
И.И. ЯМАНСАРИН, к.т.н., ст. преподаватель;  
А.С. БЕЗГИН, к.т.н., ст. преподаватель  
Оренбургский государственный университет  
460018, г. Оренбург, просп. Победы 13  
*E-mail: yama-ildar@yandex.ru*

## Об испытании двухфазного асинхронного электродвигателя с внешним ротором и несимметричной обмоткой статора

**Аннотация.** Представлена бесконденсаторная схема получения двухфазного напряжения со сдвигом на 90 эл. градусов, предназначена для питания двухфазного асинхронного двигателя, имеющего обмотку статора с разными параметрами. Представлены результаты испытания спроектированного электродвигателя.

**Ключевые слова:** двухфазный асинхронный двигатель, внешний короткозамкнутый ротор.

E. L. GREKOV, Ph. D., associate Professor;  
M.P. SALIKOV, Ph.D., Associate Professor;  
I.I. IAMANSANARIN, Ph.D., art. Teacher;  
A.S. BEZGIN, Ph.D., art. Teacher

Orenburg State University  
460018, Orenburg, prosp. Pobedy 13  
*E-mail: yama-ildar@yandex.ru*

## About testing asynchronous motors with external rotor and asymmetric stator winding

**Abstract.** A scheme is presented for obtaining a two-phase voltage system. The circuit is designed to supply a two-phase asynchronous motor having a stator winding with different parameters. The results of testing a designed electric motor are presented.

**Keywords:** two-phase asynchronous motor, external short-circuited rotor.

На кафедре автоматизированного электропривода и электромеханики ОГУ разрабатывается электропривод индивидуального транспорта, для привода которого используется встроенное мотор колесо. В качестве двигателя мотор колеса использован асинхронный электродвигатель.

Для этого рассчитан и изготовлен двухфазный асинхронный электродвигатель с внешним короткозамкнутым ротором (рис. 1) [1]. Существенными параметрами на этапе проектирования были габаритные размеры электродвигателя, питание и частота вращения электродвигателя.

В частности, длина корпуса электродвигателя не должна была быть больше 80 мм. Соответственно электродвигатель получился похожим по форме на диск длиной 80 мм и диаметром 200 мм. Запитывается электродвигатель от аккумулятора напряжением 48 В через двухфаз-

ный преобразователь частоты (ПЧ) [2]. Номинальная частота питающего напряжения равна 25 Гц. Синхронная частота вращения 500 об/мин.

Основным направлением для сокращения длины корпуса было выполнение лобовых частей обмотки более компактными. Для уменьшения вылета лобовых частей пазы статора выполнены таким образом, чтобы при намотке обмоток лобовые части разных фаз не пересекались. Таким образом, длина катушек фаз и глубина пазов получилась разной. Магнитная цепь фаз также получилась различной. Поэтому у электродвигателя получились разные параметры схемы замещения по фазам. Расчетные параметры спроектированного и изготовленного электродвигателя представлены в табл. 1.



Рис. 1. Спроектированный асинхронный двигатель с внешним ротором

Таблица 1. Параметры электродвигателя

Параметры электродвигателя	Расчетные	Изготовленного образца
Фаза «а»		
Активное сопротивление короткого замыкания, Ом	0,47	0,54
Индуктивное сопротивление рассеяния короткого замыкания, Ом	0,9	0,92
Фаза «b»		
Активное сопротивление короткого замыкания, Ом	0,47	0,64
Индуктивное сопротивление рассеяния короткого замыкания, Ом	0,5	0,36

Механические и рабочие характеристики испытуемого двигателя определялись с помощью нагрузочной машины. Соединение, с которой

осуществляется зубчатым ремнем, охватывающим внешний ротор испытуемого двигателя и зубчатый выходной конец вала нагрузочной машины.

При первом пробном включении спроектированного электродвигателя от преобразователя частоты механические и рабочие характеристики оказались намного хуже, чем были получены при проектировании. В частности, момент, развиваемый электродвигателем, был не выше 6 Нм. Полезная мощность в 4 раза меньше расчетной.

Известно, что для питания от ПЧ подходят не все электродвигатели. В лучшем при питании от ПЧ случае характеристики могут ухудшиться на 10-15 % по сравнению с питанием от синусоидального источника питания. А в некоторых случаях питание от ПЧ не совсем целесообразно. Поэтому для исключения описанного случая изготовленный электродвигатель испытали от сети синусоидального тока.

Для получения двухфазного источника питания со сдвигом на 90 эл. градусов можно в одну из фаз включить конденсаторную батарею. Но данный вариант нецелесообразен, так как требует большой емкости конденсаторов. Поэтому для питания испытуемого двигателя была использована следующая схема испытательного стенда (рис. 2).

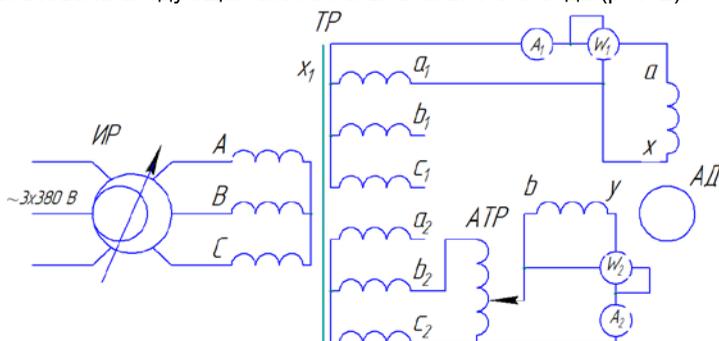


Рис. 2. Принципиальная схема испытательного стенда

Индукционный регулятор ИР в данной схеме позволяет плавно регулировать напряжение питания испытуемого двигателя. Сдвиг фаз на 90 градусов обеспечивается за счет питания одной фазы от фазы «a<sub>1</sub>», а другой фазы от линейного напряжения фаз «b<sub>2</sub>» и «c<sub>2</sub>». Автотрансформатор ATP позволяет регулировать плавно напряжение относительно фаз испытуемого электродвигателя. Понижительный трансформатор TP позволяет расширить диапазон регулирования индукционного регулятора ИР.

Так как электродвигатель будет запитываться напряжением частотой 50 Гц, а не 25 Гц то величина испытательного напряжения будет увеличена в два раза и составляет 68 В.

При питании двух фаз электродвигателя напряжением 68 В, механические характеристики двигателя получились такими же как при питании от ПЧ. Из этого следует что источник питания незначительно влияет на характеристики спроектированного электродвигателя. Из таблицы 2 видно, что фаза «b» электродвигателя при увеличении нагрузки не участвует в работе. Ток фазы «b» остается практически неизменным.

Анализ данных табл. 2 показывает, что в следствии неравенства параметров фаз двигателя намагничивающий ток фаз также разный. Следовательно, магнитное поле в воздушном зазоре сильно отличается от кругового и механические характеристики будут не удовлетворительными. Для того что чтобы улучшить характеристики нужно на фазы испытуемого двигателя подавать разное по величине напряжение.

Таблица 2. **Характеристики электродвигателя при равном напряжении фаз**

Характеристика	f=50 Гц, U <sub>a</sub> =68В, U <sub>b</sub> = 68В		
	23,5	23,5	24,5
Ток фазы «a» I <sub>a</sub> , А	23,5	23,5	24,5
Ток фазы «b» I <sub>b</sub> , А	6	6,5	6,5
Потребляемая мощность P, Вт	540	1040	1280
Момент M, Нм	0	2,7	5,4
Угловая скорость ω, рад /с	104,1	99,4	98,0
Полезная мощность P <sub>2</sub> , Вт	0	268,47	529,
КПД	0	0,258	0,413
Скольжение s, о.е.	0,0047	0,05	0,063
Коэффициент мощности cosφ	0,269	0,51	0,61

При приближении поля к круговому увеличивается момент развиваемый двигателем. По опытным данным табл. 3 видно при увеличении тока в фазе «b» частота вращения ротора увеличивается, а токи в фазе «a» снижаются, в фазе «b» увеличиваются.

Таблица 3. **Зависимость частоты вращения ротора от напряжения в фазе «b»**

	f=50 Гц, U <sub>a</sub> =48В			
	945	947	959,5	961,6
Частота вращения ротора n, об/мин	945	947	959,5	961,6
Напряжение фазы «b» U <sub>b</sub> , В	50	60	63	66
Ток фазы «a» I <sub>a</sub> , А	17	12,5	12	11
Ток фазы «b» I <sub>b</sub> , А	5,5	9,5	12	15

В табл. 4 приведены рабочие характеристик испытуемого электродвигателя, при равных токах холостого хода. Для того чтобы выровнять токи холостого хода на фазы «a» и «b» поданы разные напряжения.

Таблица 4. Характеристики двигателя при равных токах холостого хода

Характеристика	f=50 Гц, U <sub>a</sub> =48В, U <sub>b</sub> = 64В			
	997	958	936	833
n, об/мин	997	958	936	833
Ток фазы «а» I <sub>a</sub> , А	11	11	12,75	17,5
Ток фазы «b» I <sub>b</sub> , А	11	11	13	14,5
Потребляемая мощность P, Вт	280	560	900	1280
Момент M, Нм	0	2,475	5,4	9
Угловая скорость w, рад /с	104	100	98	87
Полезная мощность P <sub>2</sub> , Вт	0	248	529	784
КПД	0	0,44	0,587	0,613
Скольжение s, о.е.	0,003	0,042	0,064	0,167
Коэффициент мощности cosφ	0,47	0,45	0,62	0,72

Несмотря на снижение напряжения, подаваемого на двигатель, мощность, момент и рабочие характеристики значительно улучшились. По токам в фазах видно, что обе фазы нагружаются примерно равномерно.

### Выводы

Результаты предварительных испытаний показывают, что для того чтобы добиться приемлемых рабочих и механических характеристик необходимо провести ряд испытаний по поиску оптимальных соотношений напряжений питания фаз электродвигателя. Напряжения питания фаз должны быть различными, так как фазы обмоток обладают разными параметрами. Критериями оптимизации должны быть максимальный момент, развиваемый электродвигателем и коэффициент полезного действия.

Так как электродвигатель питается через ПЧ, то он должен быть спроектирован таким образом, чтобы обеспечить нужное напряжение в фазах обмотки.

Изготовленный электродвигатель по рабочим характеристикам почти соответствует характеристикам, заложенным в проекте. По результатам испытаний необходимо провести уточнение методики расчета мотор колеса.

### Литература

1. **Ямансарин И.И.** О возможности использования асинхронного двигателя в качестве мотор колеса для электровелосипеда // Труды VIII всеросс. науч. техн. конф. «Энергетика: состояние проблемы, перспективы»: тез. докл. ОГУ. – Оренбург. 2016. – с. 167-169. ISBN 978-5-91854-236-1
2. **Безгин А.С.** Расширение нагрузочной способности тиристорного непосредственного преобразователя частоты в верхнем диапазоне регулирования выходной частоты выше 25Гц А.С. Безгин, Э.Л. Греков // Вестник Оренбургского государственного университета.- 2013.- № 9, сентябрь.- С.170 -176.

УДК 621.313.84

Д.С. КОРНИЛОВ, старший преподаватель;  
Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: elmash@em.ispu.ru*

## **Экспериментальные исследования торцевого генератора с улучшенными массогабаритными и энергетическими показателями**

**Аннотация.** Приведены рекомендации по улучшению массогабаритных и энергетических показателей торцевых генераторов с постоянными магнитами (ТГПМ). Представлены результаты эксперимента, подтверждающие адекватность разработанных моделей и обоснованность рекомендаций.

**Ключевые слова:** торцевой генератор, система проектирования, совершенствование конструкции, результаты эксперимента.

D.S. KORNILOV Senior Lecturer;  
Yu.B. KAZAKOV Doctor of Engineering, professor  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: elmash@em.ispu.ru*

## **Experimental tests of the axial-flux generator with improved mass-dimensional and energy properties**

**Abstract.** Recommendations for improving the mass-dimensional and energy properties of the axial-flux permanent magnet generator (AFPM generator) are proposed. The results of the experiment confirming the adequacy of the developed models and the validity of the recommendations are presented.

**Key words:** axial-flux generator, design system, design development, experimental results.

Многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей подтверждают наличие у торцевых генераторов ряда преимуществ перед генераторами традиционной цилиндрической конструкции при использовании их в безредукторных ВЭУ и ГЭС малой мощности. К таким преимуществам относятся меньшие масса и осевые габариты, возможность эффективного размещения большого числа полюсов, высокая степень использования высококоэрцитивных постоянных магнитов (магниты простой формы с большой рабочей поверхностью и малой высотой), размещение обмоток на периферии машины и их более эффективное охлаждение, высокая жесткость конструкции [1, 2].

Среди большого разнообразия конструкций торцевых машин в качестве объекта для исследования выбран генератор с двойным ротором и

магнитоэлектрическим возбуждением. Исследуемый генератор объединяет в себе три перспективных технических решения: торцевая однопакетная конструкция с двойным внешним ротором, кольцевой беспазовый статор и высококоэрцитивные постоянные магниты NdFeB.

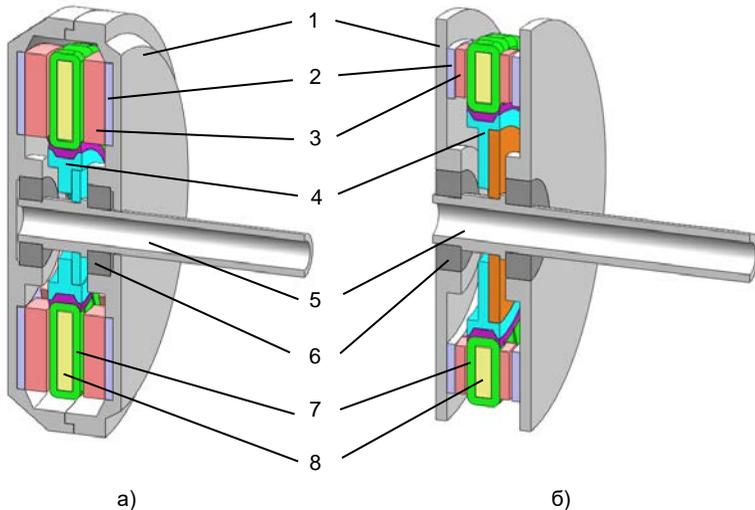


Рис. 1. Конструкции генератора-прототипа (а) и нового генератора (б):  
 1 – корпус, 2 – сердечник ротора, 3 – постоянный магнит, 4 – составная втулка,  
 5 – несущий вал, 6 – подшипник, 7 – обмотка статора, 8 – сердечник статора

В настоящее время авторами разработаны модель совместного расчета электромагнитных, тепловых и аэродинамических полей в генераторе в трехмерной постановке [3] и система проектирования генератора, объединяющая проектный расчет по оригинальному алгоритму и поверочный электромагнитный расчет на конечно-элементной параметрической модели [4]. Завершающим этапом исследования ТГПМ стали лабораторные испытания генераторов для проверки адекватности разработанных моделей и подтверждения обоснованности предложенных рекомендаций, направленных на повышение энергетических и массогабаритных показателей машин.

Объектами испытаний являлись генератор-прототип и новый усовершенствованный генератор (рис. 1). Номинальные данные, массы активных материалов и удельные мощности генераторов приведены в табл.1. Лабораторные исследования включали в себя серию опытов при постоянном активном сопротивлении нагрузки и переменной частоте вращения, в которых были определены скоростные нагрузочные характеристики  $U = f(n)$  и зависимости  $I = f(n)$ . По ним рассчитаны внешние  $U = f(I)$  и энергетические  $P2 = f(I, n)$  характеристики, а также

зависимости  $X_d = f(l, n)$ . Проведены опыты нагрузки генераторов на неуправляемый выпрямитель с целью оценки искажения фазных напряжений и токов, а также уровня пульсаций выпрямленного напряжения.

Таблица 1. Сравнение показателей генераторов

Показатели	Генератор-прототип	Новый генератор
Мощность, Вт	500	1250
Фазное напряжение, В	21,5	21,5
Фазный ток, А	7,8	19,4
Частота вращения, об/мин	750	750
Масса магнитов, кг	4,06	0,97
Масса меди, кг	1,4	1,78
Масса стали, кг	5,3	3,4
Масса активных материалов, кг	10,76	6,15
Удельная мощность, Вт/кг	46,3	203,3

Результаты сравнения опытных и расчетных данных подтвердили высокую точность используемых моделей.

Проведенные работы по совершенствованию конструкции генератора позволили снизить массу активных материалов на 43 % (с 10,76 до 6,15 кг) при увеличении номинальной мощности в 2,5 раза. Этого удалось добиться благодаря следованию разработанным рекомендациям:

1. Замена ферритовых магнитов на редкоземельные магниты.
2. Замена круглого провода обмотки статора на прямоугольный.
3. Выполнение обмотки статора по возможности небольшим числом витков большого сечения.
4. Поиск и использование рациональных соотношений размеров активных частей генератора.

При поиске рациональных соотношений оставались неизменными плотность тока в обмотке статора, внешний диаметр сердечника статора, номинальное напряжение и частота вращения, воздушный зазор между катушкой и магнитом. Целевой функцией при этом являлась максимальная удельная мощность как отношение полезной мощности генератора к массе активных материалов.

Результаты сравнения экспериментальных данных исследуемых генераторов подтвердили обоснованность данных рекомендаций.

#### Литература

1. Паластин Л.М. Синхронные машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1980.
2. Gieras J.F. Wang R.J. Kamper M.J. Axial flux permanent magnet brushless machines. – Springer, 2008.
3. Корнилов Д.С., Казаков Ю.Б. Расчет характеристик торцевого магнитоэлектрического генератора на основе совместного моделирования электромагнит-

ных, тепловых и аэродинамических полей // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 2. С 37-40.

4. **Корнилов Д.С., Казаков Ю.Б.** Система проектирования торцевого магнито-электрического генератора // Радиозлектроника, электротехника и энергетика. – 2016. – Т. 2. – С. 11.

УДК 621.313

Н.К. ШВЕЦОВ, ассистент;  
Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
*E-mail: elmash@em.ispu.ru*

### **Расчет и анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с учетом несинусоидального перемагничивания сердечников**

**Аннотация.** Разработана методика расчета дополнительных потерь в стали асинхронных двигателей при питании несинусоидальным напряжением с учетом потерь в стали ротора и перемагничивания сердечников по частичным гистерезисным циклам.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, преобразователь частоты, дополнительные потери, вихревые токи, частичные петли гистерезиса.

N.K. SHVETSOV, assistant;  
Yu.B. KAZAKOV, Doctor of Engineering, professor.

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: elmash@em.ispu.ru*

### **Estimating and analysis of steel losses in the induction motors under supplying by frequency converters with considering the nonsinusoidal remagnetization of cores**

**Abstract.** The method of steel losses calculation in induction motors under supplying by nonsinusoidal voltage, considering steel loss inside rotor core and partial hysteresis loops remagnetization is developed.

**Key words:** induction motor, frequency converter, additional losses, eddy current, partial hysteresis loops.

Развитие средств и методов частотного управления асинхронными двигателями (АД) дало возможность широкого использования АД для выполнения задач, требующих плавного и экономичного регулирования частоты вращения в широких пределах. Это обуславливает растущую долю потребляемой АД мощности в общем энергопотреблении.

При частотном управлении питание АД происходит через преобразователь частоты (ПЧ), формирующий необходимую амплитуду и частоту питающего напряжения методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Выходное напряжение ПЧ является несинусоидальным и содержит широкий спектр высших гармоник (ВГ), что является причиной дополнительных потерь в АД [1]. Ввиду широкой распространенности АД, работающих в системах частотного регулирования, расчет и анализ дополнительных потерь от ВГ является актуальной задачей.

Дополнительные потери в АД от ВГ выделяются в обмотках и стали. Увеличение потерь в обмотках АД происходит вследствие вытеснения токов ВГ на поверхность проводников и, следовательно, увеличения активного сопротивления обмоток для токов ВГ [1]. Поскольку для ВГ скольжение АД близко к единице, энергия ВГ выделяется в виде потерь. Увеличение потерь в стали АД связано с несинусоидальным характером изменения магнитной индукции в различных частях сердечников, что приводит к дополнительным потерям на вихревые токи и гистерезис.

Методика расчета дополнительных потерь в АД от ВГ основана на разложении формы питающего напряжения в ряд Фурье и последующем анализе действия каждой гармоники в отдельности [1]. При этом расчет увеличения потерь на вихревые токи и гистерезис необходимо производить отдельно по причине различия зависимости указанных потерь от частоты и амплитуды магнитной индукции. Для этого необходимо провести разделение основных потерь в стали в номинальном режиме [2]:

$$P_{ст.осн.н} = P_{вх.н} + P_{гс.н} = B_{экв1} (k_{вх} f_1^2 + k_{гс} f_1) (m_{a1} + m_{z1}) \quad (1)$$

где  $P_{вх.н}$  и  $P_{гс.н}$  – составляющие потерь в стали на вихревые токи и гистерезис, соответственно;  $B_{экв1}$  – эквивалентная усредненная величина основной гармоники магнитной индукции в сердечнике статора;  $k_{вх}$  и  $k_{гс}$  – условно постоянные коэффициенты потерь на вихревые токи и гистерезис, соответственно, определяемые маркой стали;  $f_1$  – частота номинального питающего напряжения,  $m_{a1}$  и  $m_{z1}$  – масса ярма и зубцов сердечника статора, соответственно. Величины, входящие в (1), можно определить согласно следующим соотношениям [2]:

$$B_{экв1} = \sqrt{\frac{B_{a1}^2 m_{a1} + B_{z1}^2 m_{z1}}{m_{a1} + m_{z1}}}, \quad (2)$$

где  $B_{a1}$  и  $B_{z1}$  – амплитуды основной гармоники магнитной индукции в ярме и зубцах сердечника статора, соответственно.

$$k_{вх} = \frac{\pi^2 d^2}{6 \rho_{ст} \gamma_{ст}}, \quad (3)$$

где  $d$  – толщина листов стали, м;  $\rho_{ст}$  – удельное электрическое сопротивление стали, Ом\*м;  $\gamma_{ст}$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>.

$$k_{ec} = \frac{\rho_{cm.оч1}}{B_{эке1}^2 f_1 (m_{a1} + m_{z1})} - \frac{\pi^2 d^2 f_1}{6 \rho_{cm} \gamma_{cm}}. \quad (4)$$

Принимая, что амплитуда магнитной индукции в отдельных частях сердечника статора пропорциональна амплитуде индукции в рабочем зазоре АД, эквивалентную усредненную величину  $\nu$ -ой гармонической магнитной индукции в сердечнике статора можно определить как [2]:

$$B_{эке\nu} = B_{эке1} \frac{U_\nu}{U_1}, \quad (5)$$

где  $\nu$  – номер гармоники,  $U_\nu$  и  $U_1$  – амплитуды гармоник.

При перемагничивании шихтованных сердечников АД полями высокочастотных гармоник, магнитный поток вытесняется из центра листов к их поверхностям. Это приводит к некоторому снижению потерь на вихревые токи, определяемому величиной [3]:

$$\xi_{\nu} = \frac{3\delta_\nu}{d} \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{d}{\delta_\nu}\right) - \sin\left(\frac{d}{\delta_\nu}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{d}{\delta_\nu}\right) - \cos\left(\frac{d}{\delta_\nu}\right)}, \quad (6)$$

где  $\delta_\nu$  – глубина проникновения электромагнитной волны в лист стали.

Потери на вихревые токи в сердечнике статора от  $\nu$ -ой гармоники :

$$p_{ex\nu} = B_{эке\nu}^2 k_{ex} f_1^2 \nu^2 \xi_\nu (m_{a1} + m_{z1}). \quad (7)$$

Коэффициент увеличения потерь на вихревые токи в статоре:

$$K_{ex} = \frac{p_{ex1} + \sum_{\nu=5}^{\infty} p_{ex\nu}}{p_{ex1}} = 1 + \sum_{\nu=5}^{\infty} \left(\frac{U_\nu}{U_1}\right)^2 \xi_\nu \quad (8)$$

Потери в стали на гистерезис пропорциональны площади петли гистерезиса. При несинусоидальном изменении магнитной индукции в сердечниках перемагничивание стали происходит, в том числе, и по частичным циклам. Количество частичных петель гистерезиса, образованных  $\nu$ -ой гармоникой магнитной индукции, зависит от порядка гармоники и ее фазы. Однако частичные петли гистерезиса образуются только от тех гармоник, производная магнитной индукции  $dB/dt$  которых противоположна по знаку производной магнитной индукции основной гармоники  $dB_1/dt$  и превосходит ее по модулю. Таким образом, можно приближенно считать, что дополнительные потери на гистерезис возникают только от действия наиболее выраженной из высших гармоник  $\nu$ ШИМ, определяемой несущей частотой ШИМ.

В этом случае коэффициент увеличения потерь на гистерезис может быть определен на основе эмпирического соотношения [4]:

$$K_{ec} = \frac{p_{ec.ШИМ}}{p_{ec1}} = \left( 1 + \frac{k}{B_{эке1}} B_{эке\nu.ШИМ} (\nu_{ШИМ} - 1) \right), \quad (9)$$

где  $B_{\text{экв.ШИМ}}$  определяется по соотношению (5) для  $\nu_{\text{ШИМ}}$ -й гармоники.

Ввиду повышенных частот полей ВГ, скольжение АД для них близко к единице [1], поэтому потери в стали от ВГ возникают и в сердечнике ротора АД. При этом токи обмотки ротора, наведенные полями ВГ, оказывают демпфирующее действие на потоки ВГ, вследствие чего потери в стали локализуются в зубцовой зоне сердечника. Амплитуду магнитной индукции в зубцах ротора для ВГ можно определить как:

$$B_{z2\nu} = B_{\text{ов}} \frac{t_{z2}}{b_{z2}} = B_{\text{о1}} k \frac{U_{\nu}}{U_{1\nu}}, \quad (10)$$

где  $B_{\text{ов}}$  – амплитуда  $\nu$ -ой гармоники магнитной индукции в зазоре АД  $t_{z2}$  и  $b_{z2}$  – пазовое и зубцовое деления сердечника ротора, соответственно;  $k = t_{z2}/b_{z2} \approx 2$ .

Потери на вихревые токи в роторе от ВГ по аналогии с (7):

$$p_{\text{ex2}} = \sum_{\nu=5}^{\infty} p_{\text{ex2}\nu} = k_{\text{ex}} m_{z2} \sum_{\nu=5}^{\infty} B_{z2\nu}^2 (f_1 \nu)^2 \xi_{\nu}, \quad (11)$$

где  $m_{z2}$  – масса зубцов сердечника ротора.

Потери на гистерезис в сердечнике ротора от  $\nu_{\text{ШИМ}}$ -й гармоники:

$$p_{\text{ec2}} = k_{\text{ec}} m_{z2} f_1 s B_{z2(1)}^2 \left( 1 + \frac{k}{B_{z2(1)}} B_{z2\nu_{\text{ШИМ}}} (\nu_{\text{ШИМ}} - 1) \right), \quad (12)$$

где  $B_{z2(1)}$  – амплитуда основной гармоники магнитной индукции в зубцах ротора.

Коэффициент увеличения потерь в стали АД при питании от ПЧ с ШИМ:

$$K_{\text{ст}} = \frac{p_{\text{ex1}} K_{\text{ex}} + p_{\text{ec1}} K_{\text{ec}} + p_{\text{ст.доб}} + p_{\text{ex2}} + p_{\text{ec2}}}{p_{\text{ст.осн.н}} + p_{\text{ст.доб}}}, \quad (13)$$

где  $p_{\text{ст.доб}}$  – добавочные потери в стали АД при синусоидальном питании.

Согласно представленной выше методике был произведен расчет увеличения потерь в стали тягового АД мощностью 170 кВт для двух форм питающего напряжения – с постоянной шириной импульсов и с синусоидально изменяющейся шириной импульсов. Результаты расчета ( $K_{\text{ст}}$ ) были сверены с данными, полученными на основе конечно-элементного моделирования рассматриваемого АД ( $K_{\text{ст.КЭ}}$ ) с использованием пакета *Ansys Maxwell* (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты увеличения потерь в стали АД

Форма питающего напряжения	$K_{\text{ст}}$	$K_{\text{ст.КЭ}}$	Расхождение, %
Постоянная ширина импульсов	1,302	1,348	3,4
Синусоидальная ширина импульсов	1,149	1,126	2,1

Анализ результатов показывает погрешность в пределах 3,4 % от-

носителю результатов, полученных численным методом. Таким образом, разработанная методика может быть использована для расчета увеличения потерь в стали АД, питаемых от ПЧ с ШИМ напряжения с минимальными затратами вычислительных ресурсов и точностью, сопоставимой с конечно-элементным расчетом.

#### Литература

1. **Казаков Ю.Б.** Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при режимных и конструктивных вариациях. – М: Издательский дом МЭИ, 2013. – 152 с.
2. **Казаков Ю.Б., Швецов Н.К.** Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением // // Вестник ИГЭУ. – ФГБОУВПО Иван. гос. энерг. ун-т. им. В.И. Ленина. – 2015. – Вып. 5. – С. 42-46.
3. **Васютинский С.Б.** Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
4. **Lavers, J.** A simple method of estimating the minor loop hysteresis loss in thin laminations // IEEE Transaction on Magnetic. – No. 5, Vol. MAG-14. – IEEE, 1978. – pp. 386-388.

УДК 621.313

Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н., профессор;  
А.Н. МОРОЗОВ, аспирант; А.П. ОКЕАНСКИЙ, магистрант  
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: elmash@em.ispu.ru*

### **Проблемы диагностики электромагнитных несимметрий электрических машин по внешнему магнитному полю**

**Аннотация.** Рассматривается необходимость и возможность контроля состояния синхронных машин по внешнему магнитному полю и определения диагностических признаков аварийных состояний машины.

**Ключевые слова:** внешнее магнитное поле, датчики магнитного поля, изменение магнитной индукции.

Yu.B. KAZAKOV, prof.; A.N. MOROZOV, graduate student;  
A.P. OKEANSKY, undergraduate  
Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
150003 Ivanovo, Rabfakovskaya 34  
*E-mail: elmash@em.ispu.ru*

### **Problems of diagnostics of electromagnetic asymmetries of electric machines by an external magnetic field**

**Abstract.** A necessity and possibility of synchronous machines control through external magnetic field and determination of diagnostic signs of emergency state is presented.

**Keywords:** an external magnetic field, sensors of magnetic field, a variation of magnetic induction.

Электрические машины создают внешние электромагнитные поля (ВЭМП). ВЭМП двигателей и генераторов распространяются в пространстве, создают электромагнитное загрязнение окружающей среды, оказывает влияние на оборудование и обслуживающий персонал. Увеличение плотности размещения и установленной мощности электрических машин усиливает влияние их ВЭМП на работу других устройств. Это вызывает проблемы электромагнитной совместимости. ВЭМП ведут к нарушениям в работе устройств автоматики, релейной защиты, связи. Они являются причиной сбоев в работе электронной техники, систем управления технологическими процессами и объектами. Среди устройств наиболее чувствительны к ВЭМП элементы микропроцессорных систем управления.

Однако магнитные поля электрических машин несут в себе и информацию о состоянии объекта, излучающего их во внешнее пространство. Увеличение срока службы, единичной мощности и появляющиеся за время эксплуатации схемные и конструктивные осложнения очень затрудняют определение технического состояния электрических машин при принятии решения по управлению, обслуживанию и выводу их в ремонт. Одним из важнейших источников состояния электрооборудования становится их ВЭМП. В настоящее время основное внимание было направлено на диагностику состояния асинхронных двигателей, как наиболее распространённого типа машины в электроприводе. Уже выполнено несколько диссертационных работ в России и за рубежом по диагностике асинхронных двигателей по результатам измерения ВЭМП.

В тоже время в современных условиях к синхронным машинам, в особенности к турбогенераторам, предъявляются все более высокие требования по надежности. Определение технического состояния этих сложных машин является трудной задачей, которую нельзя решить путем проведения типовых профилактических испытаний. Эффективность работы промышленных и энергетических предприятий зависит от надежной работы мощных синхронных генераторов (СГ) и синхронных двигателей (СД). Отказы машин связаны с обмоткой статора, подшипниками, системой охлаждения, железом статора, валом ротора и т.п. Определить виды дефектов сложно из-за их комплексного проявления и скрытых причинно-следственных связей.

Специфической особенностью электроэнергетики является желательное устранение дефектов генерирующего оборудования в период плановых ремонтов. Вывод генератора во внеплановый ремонт наносит электрогенерирующей организации большой ущерб. Выход из строя СГ ведёт к штрафам за снижение рабочей мощности и снижению прибыли от реализации электроэнергии. Наиболее высокие штрафы назначаются за первые часы аварийного отключения СГ. Взыскание уменьшается по мере течения времени с момента аварии.

За 2016 года ущерб от аварийного выхода из строя синхронных турбогенераторов только одного электрогенерирующего холдинга составил более 1,5 млрд рублей, что соответствовало 3 млн рублей за каждый день простоя. Особенно тяжёлые потери понесли электрогенерирующие организации за первые часы простоя – 2,5 млн рублей за час в течение первых четырёх часов. Даже если исключить одну особо тяжёлую аварию, то каждое аварийное отключение стоило в среднем более 87 млн рублей при стоимости каждого первого часа почти 1,5 млн рублей. Заблаговременная подача оперативных уведомлений Системному оператору позволила бы сэкономить от 100 до 1000 тыс. рублей в час при неплановом ремонте. Ущерб предприятий связан с ремонтом ЭМ, с браком и недовыпуском продукции, штрафными санкциями на рынке электроэнергии и мощности. Диагностика синхронных машин, в частности генераторов, является актуальной технической задачей.

Конечной целью технической диагностики является устранение дефекта, но только обнаружение дефекта до отказа машины является главным аргументом, оправдывающим затраты на систему диагностики. Скрытность причинно-следственных связей присуща практически всем видам дефектов электрооборудования. На сессиях СИГРЭ ставилась задача достоверного выявления состояния синхронных машин.

В разных работах [1, 2] измеряют внешнее магнитное поле вокруг ЭМ и проводят спектральный анализ полученного сигнала, по которому может быть определен вид дефекта и оценена степень его развития. Однако экранирование полей корпусом снижает достоверность результатов, нет методики прогнозирования остаточного ресурса, мало исследованы диагностические параметры, характеризующие разные процессы в машине. Работы по определению диагностических параметров состояния электрических машин по ВЭМП в настоящее время актуальны.

Для оценки возможности использования ВЭМП для контроля состояния СГ была выполнена в «Eicut» модель явнополюсной машины с 6 полюсами, корпусом из алюминия для учёта его экранирующего действия и внешними датчиками магнитного поля, установленными вне корпуса по осям каждого полюса. Рассматривалось изменение внешнего магнитного поля машины при уменьшении числа витков обмотки возбуждения до полного её отсутствия полюса 1.

На рис. 1 показан характер изменения ВЭМП для каждого датчика в процентах от нормального состояния машины, при активно-индуктивной нагрузке и уменьшении поля возбуждения под полюсом 1, абсолютные значения магнитной индукции в норме составляли 0,387 мТл.

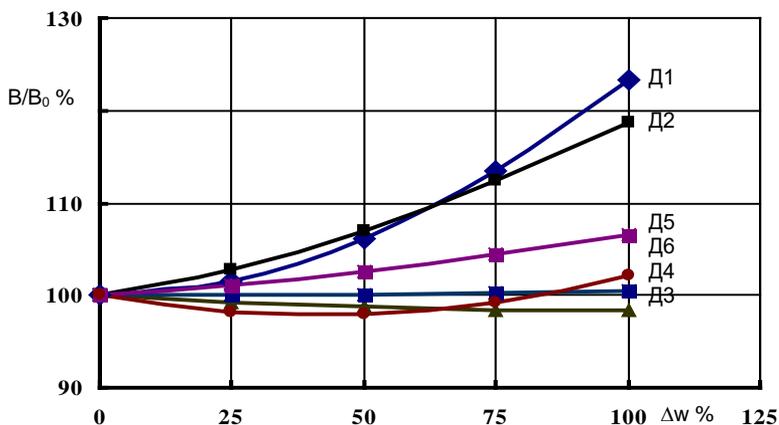


Рис. 8. Изменение магнитной индукции при активно-индуктивной нагрузке и уменьшении числа витков обмотки возбуждения полюса 1

#### Литература

1. Сидельников, Л.Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации. / Л.Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7
3. Полищук, В.И. Разработка способа выявления виткового замыкания в обмотке возбуждения синхронной машины / В.И. Полищук, Ю.З. Васильева // Научное обозрение. – 2014. – №12. – С. 55–59.

УДК 621.313.333

В.П. ШИШКИН, к.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: shishkin@emf.ispu.ru

### Зависимость главных размеров торцевого магнитоэлектрического генератора от соотношения диаметров

**Аннотация.** Установлена зависимость главных размеров торцевого магнитоэлектрического генератора от соотношения внешнего и внутреннего диаметров; найден диапазон этого соотношения, обеспечивающий минимальные размеры генератора.

**Ключевые слова:** торцевой магнитоэлектрический генератор, соотношение диаметров, минимальные размеры.

V.P. SHISHKIN, candidate of technical Sciences, Professor

Ivanovo State Power University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34  
E-mail: shishkin@emf.ispu.ru

## The dependence of the main dimensions of the end magneto generator from the ratio of the diameters

**Abstract.** The dependence of the main dimensions of the end magneto-electric generator, the ratio of external and internal diameters; find the range of this ratio, providing the minimum dimensions of the generator.

**Key words:** end magneto generator, the ratio of the diameters of a minimum size

При проектировании электрических машин, особенно для автономных систем, большое внимание уделяется снижению их массогабаритных показателей. Чтобы найти решение, надо установить связь главных размеров с минимальным количеством геометрических параметров машины. Тогда становится возможным определить те значения этих параметров, которые соответствуют оптимальным соотношениям [1].

Исследуем функциональную зависимость главных размеров торцевого магнитоэлектрического генератора от геометрического параметра  $a$ , равного отношению внешнего и внутреннего диаметров  $a = D_{вн}/D_{вн}$  (рис. 1) при заданных исходных данных и значениях  $B_{м0}$  и  $H_{мк}$ .

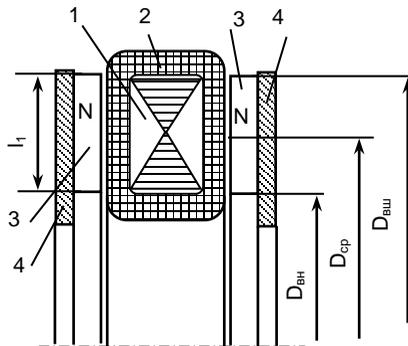


Рис. 1. Схема активной части торцевого магнитоэлектрического генератора: 1 – сердечник статора; 2 – кольцевая обмотка якоря; 3 – постоянный магнит; 4 – сердечник индуктора

В [2] приведена формула внутреннего диаметра

$$D_{вн} = \sqrt[3]{\frac{0,45P_{эм}\sigma_0\alpha_1k_{ад}k_{кз}}{k_{ф}f\pi\alpha_p B_{м0}H_{мк}(a^2 - 1)\lambda_m}}, \quad (1)$$

где  $P_{эм}$  – расчетная (электромагнитная) мощность;  $\sigma_0$  – коэффициент рассеяния;  $\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения в магнитной цепи генератора в долях продольной МДС реакции якоря при коротком замыкании;  $k_{ад}$  – коэффициент продольной реакции якоря;  $k_{кз}$  – кратность тока короткого замыкания;  $k_{ф}$  – коэффициент формы поля;  $f$  – частота тока;  $B_{м0}$  – индукция в нейтральном сечении магнита при холостом ходе;  $H_{мк}$  – напряженность магнитного поля в постоянном магните при коротком замыкании;  $\lambda_m$  – геометрический коэффициент, равный отношению высоты магнита к внутреннему диаметру  $h_m/D_{вн}$ .

Придадим формуле внутреннего диаметра (1) следующий вид

$$D_{вн} = \sqrt[3]{\frac{0,45P_{эм}\sigma_0\alpha_1k_{ад}k_{кз}}{k_{ф}f\pi\alpha_p B_{м0}H_{мк}\lambda_m}} \sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}} = C\sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}} = Ck_{вн},$$

из которого можно вывести коэффициент внутреннего диаметра  $k_{вн}$

$$k_{вн} = \sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}}.$$

Здесь  $C$  – параметр, определяемый исходными данными на проектирование торцевого генератора

$$C = \sqrt[3]{\frac{0,45P_{эм}\sigma_0\alpha_1k_{ад}k_{кз}}{k_{ф}f\pi\alpha_p B_{м0}H_{мк}\lambda_m}}.$$

Для внешнего  $D_{внш}$ , среднего  $D_{ср}$  диаметров статора и длины сердечника  $l_1$  можно получить аналогичные зависимости

$$D_{внш} = aD_{вн} = Ca\sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}} = Ck_{внш},$$

$$D_{ср} = 0,5(D_{внш} + D_{вн}) = C0,5\sqrt[3]{\frac{(a+1)^2}{a-1}} = Ck_{ср},$$

$$l_1 = 0,5(D_{внш} - D_{вн}) = C0,5\sqrt[3]{\frac{(a-1)^2}{a+1}} = Ck_{l_1},$$

где:

$$k_{внш} = a\sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}} \text{ – коэффициент внешнего диаметра;}$$

$$k_{ср} = 0,5\sqrt[3]{\frac{(a+1)^2}{a-1}} \text{ – коэффициент среднего диаметра;}$$

$$k_l = 0,5\sqrt[3]{\frac{(a-1)^2}{a+1}} - \text{коэффициент длины статора.}$$

Зависимости коэффициентов  $k_{вщ}$ ,  $k_{вн}$ ,  $k_{ср}$ ,  $k_l$  от геометрического параметра  $a$  представлены на рис. 2.

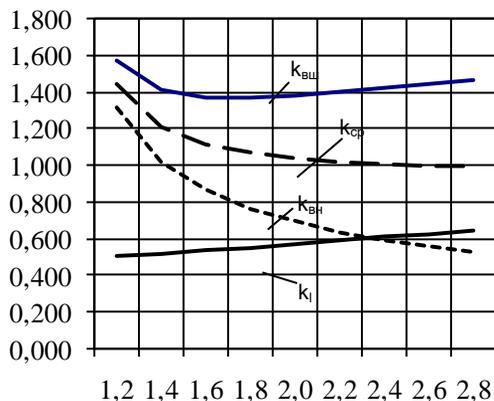


Рис. 2. Зависимости коэффициентов диаметров и длины от геометрического параметра

Как видно из рис. 2, коэффициент внешнего диаметра, начиная с  $a = 1,4$ , изменяется незначительно; при  $a \approx 1,6 \div 1,9$  он принимает минимальное значение.

#### Литература

1. Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального исполнения. – М.: Энергтоатомиздат, 1990 г., 301 с.
2. Шишкин В.П. Автоматизированное проектирование торцевых магнитоэлектрических генераторов переменного тока. Учебное пособие, Иваново, 2006, 68 с.

УДК 621.313.333

М.В. САХАРОВ, магистрант;  
В.Н. КАРАУЛОВ, к.т.н., доцент  
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: saharovemail@gmail.com*

### **Анализ конструкции, электромеханических и тепловых процессов обращённого СДПМ лебёдки**

**Аннотация.** Разработана конструкция обращённого синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебёдки, проведены поверочные расчёты и конечно-элементное моделирование электромеханических и тепловых процессов, по их результатам скорректирована конструкция.

**Ключевые слова:** синхронный электропривод, постоянные магниты, полевое моделирование, электромеханические и тепловые процессы.

M.V. SAKHAROV undergraduate student;  
V.N. KARAULOV Candidate of Engineering, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: saharovemail@gmail.com*

### **Analysis of design, electromechanical and thermal processes of PMSM of reversed design winch**

**Abstract.** A design of permanent-magnet synchronous motor of reversed design of a winch is developed, controlling calculations and finite-elements modelling of electromechanical and thermal processes are performed, the design is modified with results of modelling.

**Key words:** a synchronous electrical drive, permanent magnets, poles modelling, electromechanical and thermal processes.

Электрификация промышленности и, в частности, буровых установок является неотъемлемой частью научно-технического прогресса. Одним из лучших вариантов электропривода лебёдок буровых установок является частотно-регулируемый привод на основе обращённого синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). Эти двигатели имеют высокий КПД, компактны и экологичны [1].

Требования к двигателю электропривода лебёдки представлены в техническом задании (табл. 1).

Нами разработана конструкция двигателя – мотор-барабан. На кронштейнах жёстко крепится неподвижный вал, на который запрессован шихтованный сердечник статора с обмоткой из круглого провода. По обе стороны от статора на вале располагаются подшипниковые узлы и подшипниковые щиты. Подшипниковые щиты соединяются с ротором-барабаном замками и стягиваются болтами. Ротор совмещает

в себе барабан-оболочку для намотки каната и магнитопровод. Для изготовления ротора используется отрезок трубы СтЗпс. Большая величина номинального тягового усилия не даёт канату совершать продольные и поперечные колебания на барабане и разрушать его. На внутренней поверхности трубы крепятся высококоэрцитивные магниты NeFeB.

Таблица 1. Техническое задание на проектирование обращённого СДПМ лебёдки

Требование/условие ТЗ	Величина требования/условия ТЗ	Единица измерения
Номинальная мощность	60	кВт
Номинальное напряжение питания	380	В
Частота питающей сети*	50	Гц
Максимальная скорость намотки каната	2,5	м/с
Номинальная скорость намотки каната	1,2	м/с
Минимальная скорость намотки каната	0,5	м/с
Номинальное тяговое усилие лебёдки	4,4	тс
Максимальный внешний диаметр барабана	850	мм
Максимальные габариты лебёдки	1000×1000×1000	мм×мм×мм
Степень защиты	IP54	-
Канатоемкость	36	м

\*Двигатель работает в составе частотно-регулируемого привода.

Выполнен поверочный электромагнитный расчёт двигателя в среде Ansys Rmxprt (рис. 1). Энергетические показатели двигателя удовлетворяют требованиям технического задания.

ROTOR DATA			
Minimum Air Gap (mm):	1	Maximum Line Induced Voltage (V):	559.755
Outer Diameter (mm):	820	Root-Mean-Square Line Current (A):	101.364
Length of Rotor (mm):	650	Root-Mean-Square Phase Current (A):	58.6594
Stacking Factor of Iron Core:	1	Armature Thermal Load (A <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ):	147.651
Type of Steel:	st3	Specific Electric Loading (A/mm <sup>2</sup> ):	47.3619
Polar Arc Radius (mm):	370.5	Armature Current Density (A/mm <sup>2</sup> ):	3.1175
Mechanical Pole Embrace:	0.7	Frictional and Windage Loss (W):	0
Electrical Pole Embrace:	0.69915	Iron-Core Loss (W):	705.479
Max. Thickness of Magnet (mm):	15	Armature Copper Loss (W):	6640.74
Width of Magnet (mm):	67.7116	Total Loss (W):	7346.22
		Output Power (W):	60007
		Input Power (W):	67353.2
		Efficiency (%):	89.093
		Power Factor:	0.999027
		Synchronous Speed (rpm):	30
		Rated Torque (N.m):	19100.8
		Torque Angle (degree):	24.1657
		Maximum Output Power (W):	119975

Рис. 1. Главные размеры и технические показатели обращённого СДПМ лебёдки

В среде Ansys Maxwell выполнено полевое моделирование электромеханического процесса пуска и номинального режима работы двигателя. Показатели пускового режима: кратность пускового тока  $K_I$  – 1,5, кратность пускового момента  $K_M$  – 2,0. Номинальный режим работы характеризуется пульсациями электромагнитного момента и частоты вращения. Тихоходный СДПМ имеет малое число пазов на полюс и фазу. Зубчатость статора усиливает зубцовые гармонические поля и соответствующие паразитные моменты. Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента изменено положение магнитов вдоль аксиальной оси машины.

Одной из проблем проектирования СДПМ закрытого исполнения, является проблема теплового состояния магнитов [2]. Главный источник тепла в обращённой конструкции (обмотка статора) расположен в центре машины. Применение масла для осуществления теплообмена решает проблему охлаждения магнитов [3]. Выполнено численное моделирование температурного поля СДПМ. Предложены конструктивные решения системы охлаждения, позволяющие уменьшить нагрев магнитов. Примерами таких решений являются развитие бокового оребрения подшипниковых щитов, выбор оптимального соотношения длины машины к диаметру. Данные о температуре магнитов в номинальном режиме работы использованы для уточнённого электромагнитного расчёта. В результате скорректированного по температуре электромагнитного расчёта установлено, что перегрузочная способность машины снижается с 2 до 1,75, а угол нагрузки  $\theta$  возрастает с 240 до 290. Для создания необходимой перегрузочной способности СДПМ потребовалось увеличить объём магнита.

Таким образом, современные средства конечно-элементного моделирования электромагнитного и теплового состояний машины и электромеханических процессов, позволяют выявить проблемные особенности работы машины, внести изменения в её конструкцию, и, в итоге, получить проект машины, удовлетворяющий требованиям технического задания.

#### Литература

1. **Меньшов Б.Г.**, Яризов А.Д., Ершов М.С. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: Учеб. для вузов. – М.: ОАО «Издательство Недра», 2000. – 487 с.; ил.
2. **Ледовский А.Н.** Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.: ил.
3. **Науменко В.И.**, Клочков Г.И. Авиационные электрические машины с интенсивным охлаждением. – М.: Машиностроение, 1977, 128 с.: ил.

УДК 621.312

Д.Е. ДРЯЗГОВ, студент, Н.А.МОРОЗОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
E-mail: *elmash@em.ispu.ru*

## Расчет времени срабатывания аппарата с размыкающим силовым контуром

**Аннотация.** Предлагается методика графоаналитического расчёта времени срабатывания контактора постоянного тока с размыкающим контактом с учётом времени затормаживания при касании главных контактов.

**Ключевые слова:** время трогания, ток трогания, время движения, время срабатывания, второй ток трогания

D.E. DRYAZGOV, student;  
N.A. MOROZOV, Candidate of Engineering Sciences  
Ivanovo State Power University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34  
E-mail: *elmash@em.ispu.ru*

## The calculation of the response time of the device with a normally closed power contact

**Abstract.** The technique of graphic-analytical calculation of the operating time of the contactor a direct current with NC contact, taking into account the time braking at the touch of the main contacts.

**Keywords:** time breakaway, the current breakaway, while driving, trip time, the second breakaway current

Известны несколько методов расчёта времени срабатывания. Наименее подробно разработаны методы расчёта времени срабатывания аппаратов с размыкающими контактами. Время срабатывания таких аппаратов определяет время их готовности к работе.

Особенностью процесса втягивания контактора с размыкающим контактом является возможность притормаживания движения якоря в момент замыкания главного контакта и преодоления силы возвратной пружины, которая удерживает контакт в замкнутом состоянии. Кроме того, раствор контактов таких контакторов более чем в три раза меньше раствора замыкающих контактов. Это отражается на времени втягивания и отпадания контакторов с размыкающими контактами, у которых при практически одинаковом времени отпадания якоря, время втягивания в 2,5 раза меньше, чем у контакторов с замыкающими контактами. Отсюда следует, что разработка методов расчёта времени втягивания контакторов с размыкающими контактами актуально.

Для расчёта времени втягивания контактора постоянного тока используют графоаналитический метод, разработанный Н.Е. Лысовым [1]. Он применим для аппаратов с любым насыщением магнитной системы, что является ограничением для различных аналитических способов.

Широкое применение компьютерной техники открывает новые возможности для использования этого метода в практике проектирования.

В методе используются зависимости потокоцепления катушки управления от тока в ней, которые получаются в ходе расчёта магнитной системы аппарата для выбранных значений рабочего зазора между якорем и сердечником. Время трогания находится из условия равенства тягового усилия электромагнита и начальной противодействующей силы. Тогда время трогания находится при условии постоянства магнитной проводимости системы и индуктивности катушки из формулы

$$t_{\text{тр}} = T_{\text{эм}} \cdot \ln \frac{I_y}{I_y - I_{\text{тр}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{эм}}$  – постоянная времени системы, определяемая отношением индуктивности катушки  $L$  к её активному сопротивлению  $R$ ;  $I_y$  – установившийся ток, а  $I_{\text{тр}}$  – ток трогания якоря, определяемый по известному потоку трогания и кривым намагничивания системы.

Время движения рассчитывается графоаналитическим методом. Для этого находят потокоцепление системы для момента трогания якоря, а затем методом подбора находят точку потокоцепления, соответствующую перемещению якоря из начального зазора к его следующему значению, которое использовалось при расчёте магнитной системы. Поиски точки основываются на удовлетворении двух равенств, определяющих электрическое состояние катушки

$$U = IR_{\text{к}} + \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} \quad (2)$$

и энергетическое равенство механического движения якоря

$$F_{\text{эм}} \Delta\delta = \Delta\left(\frac{mv^2}{2}\right) + F_{\text{пр}} \Delta\delta. \quad (3)$$

Применение современных программных средств позволяет быстро рассчитать площади между кривыми потокоцепления, определить работу при перемещении якоря и найти скорость приобретаемую якорем при его движении от одного зазора к другому.

Особенность расчёта движения подвижной системы контактора с размыкающим контактом заключается в нахождении точки затормаживания якоря в момент размыкания контактов и полного проявления действия возвратной пружины. В таких контакторах возвратная пружина развивает усилия много больше, чем при замыкающем контакте. Она обеспечивает нажатие контактов и превышает силы контактной пружины в 1,2–1,4 раза. В результате при движении втягивания якорь может остановиться при размыкании контактов, и следует рассчитывать второе время трогания  $t_{\text{тр}2}$  с учётом уже протекающего по катушке тока.

$$t_{\text{тр}2} = T_{\text{эм}2} \cdot \ln \frac{I_y - I_{\text{т}}}{I_y - I_{\text{тр}2}}. \quad (4)$$

Здесь  $T_{ЭМ2}$  – постоянная времени катушки управления для зазора притормаживания якоря;  $I_T$  – ток в катушке при останове якоря в момент размыкания контактов;  $I_{TP2}$  – ток в катушке при повторном начале движения якоря.

Постоянная времени  $T_{ЭМ2}$  определяется уже не для начального зазора, а для момента размыкания контактов. В целях получения этих расчётных данных следует при расчёте магнитной системы одним из расчётных зазоров назначить и этот зазор, известный из расчёта характеристики противодействующих усилий. Ток торможения  $I_T$  в момент остановки якоря определяется из предшествующего цикла расчётов. Затем ток катушки увеличивается при неизменном зазоре, соответствующем размыканию контактов. Далее следует определить второй ток трогания якоря  $I_{TP2}$  по условию равенства тягового усилия системы и противодействующей силы, как это было сделано при нахождении момента трогания якоря в начале движения. После этого следует продолжить расчёт второго времени движения, по известной методике.

В алгоритме расчёта времени срабатывания контактора с размыкающим контактом следует предусмотреть несколько моментов. В алгоритме расчёта, предложенном Лысовым Н.Е., определяется только средняя электромагнитная сила при перемещении якоря от одного зазора к другому. Для контроля момента промежуточного останова якоря надо знать тяговое усилие в положении, в которое перемещается якорь. Так как используется кусочно-линейная аппроксимация, то значение конечного усилия  $F_2$  при известных начальной силе на участке  $F_1$  и среднем значении  $F_{CP}$  можно найти по формуле

$$F_2 = 2 F_{CP} - F_1. \quad (5)$$

В программе расчёта следует предусмотреть постоянное сравнение тягового и противодействующего усилия. Как только противодействующая сила станет больше тяговой, следует обнулить скорость движения якоря и перейти к расчёту второго тока и времени трогания. Второе время трогания будет невелико, потому что рабочий зазор ещё велик, магнитная проводимость системы и индуктивность катушки малы. После расчёта второго времени трогания определяют второе время движения и полное время втягивания контактора..

Применение программы расчёта времени срабатывания контактора с размыкающим контактом показало, что при больших коэффициентах запаса по тяговой характеристике торможения якоря может не происходить. Так как провал размыкающего контакта соизмерим с его раствором, то тяговое усилие нарастает так быстро, что в момент размыкания главных контактов превышает противодействующее усилие.

#### Литература

1. Лысов, Н.Е. Расчёт электромагнитных механизмов / Н.Е. Лысов. – М.: Обorongиз, 1949. – 111 с.

УДК 62-83:681.51:621.382.3

А.М. ШУРЫГИН, к.т.н., доцент;

М.Н. ШУРЫГИН, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

*E-mail: admin@tam.ispu.ru*

## **Моделирование систем питания электромеханических устройств в машиностроении**

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы моделирования силовых преобразователей, применяемых для питания электромеханических устройств технологического оборудования. Представлены выражения для моделирования импульсного силового преобразователя при симметричном и несимметричном управлении.

**Ключевые слова:** модель, силовой преобразователь, управление.

A.M. SHURYGIN, Candidate of Engineering, docent;

M.N. SHURYGIN, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

*E-mail: admin@tam.ispu.ru*

## **Modeling of power supply systems for electromechanical devices in mechanical engineering**

**Abstract.** Questions of modeling of the power converters used to supply electromechanical devices of technological equipment are considered. Expressions for modeling of the pulse power converter under symmetric and asymmetric control are presented.

**Key words:** model, power converter, control.

В настоящее время регулирование координат электромеханических устройств часто выполняется с использованием полупроводниковых преобразователей. Управление координатами автоматизированных электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока обычно реализуется на основе применения реверсивных транзисторных силовых преобразователей. Реверсивные преобразователи выполняются, как правило, по мостовой схеме и реализуются с помощью четырех симметричных ключевых элементов. Каждый ключевой элемент преобразователя представляет собой сочетание транзистора, выполняющего функцию электронного ключа, и шунтирующего обратного диода. Для двухфазных двигателей переменного тока обычно используются два однотипных широтно-импульсных преобразователя (ШИП), выполняемых по мостовой схеме и управляемых от одного интерфейса сопряжения [1, 2].

В электроприводах малой мощности обычно применяется симметричная коммутация силовых транзисторных ключей. Основным недостатком ШИП с симметричным управлением являются повышенные пульсации токов в фазных обмотках статора двигателя. Стремление минимизировать этот недостаток привело к появлению несимметричного способа управления ключами ШИП.

Для моделирования двухфазного реверсивного ШИП в среде MathCAD с использованием традиционных допущений получены выражения, определяющие выходные ЭДС преобразователя  $E_{\text{шип}_\alpha}(t)$ ,  $E_{\text{шип}_\beta}(t)$  по осям неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  при симметричном и несимметричном управлении силовыми ключами. В случае симметричной коммутации

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{шип}_\alpha}(t) := \begin{cases} E_{\text{и}} & \text{if } t - \text{floor}\left(\frac{t}{T_{\text{шип}}}\right) \cdot T_{\text{шип}} \leq \frac{T_{\text{шип}}}{2} + t_{\text{упр}_\alpha}(t) \\ E_{\text{н}} & \text{otherwise} \end{cases} \\ E_{\text{шип}_\beta}(t) := \begin{cases} E_{\text{и}} & \text{if } t - \text{floor}\left(\frac{t}{T_{\text{шип}}}\right) \cdot T_{\text{шип}} \leq \frac{T_{\text{шип}}}{2} + t_{\text{упр}_\beta}(t) \\ E_{\text{н}} & \text{otherwise} \end{cases} \end{array} \right. , \quad (1)$$

в случае несимметричной коммутации

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{шип}_\alpha}(t) := \begin{cases} E_{\text{и}_\alpha}(t) & \text{if } t - \text{floor}\left(\frac{t}{T_{\text{шип}}}\right) \cdot T_{\text{шип}} \leq t_{\text{упр}_\alpha}(t) \\ E_{\text{н}} & \text{otherwise} \end{cases} \\ E_{\text{шип}_\beta}(t) := \begin{cases} E_{\text{и}_\beta}(t) & \text{if } t - \text{floor}\left(\frac{t}{T_{\text{шип}}}\right) \cdot T_{\text{шип}} \leq t_{\text{упр}_\beta}(t) \\ E_{\text{н}} & \text{otherwise} \end{cases} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где  $T_{\text{шип}}$  – период работы преобразователя;  $t_{\text{упр}_\alpha}(t)$ ,  $t_{\text{упр}_\beta}(t)$  – сигналы управления по осям  $\alpha, \beta$ ;  $t$  – время;  $\text{floor}$  – функция выделения целой части числа. В выражениях (1)  $E_{\text{и}}=E_{\text{д}}$  – ЭДС импульса;  $E_{\text{н}}=(-E_{\text{д}})$  – ЭДС паузы;  $E_{\text{д}}$  – ЭДС на выходе звена постоянного тока. В выражениях (2)  $E_{\text{и}_\alpha}(t)$ ,  $E_{\text{и}_\beta}(t)$  – ЭДС импульса по осям  $\alpha, \beta$ , амплитуда которых составляет  $E_{\text{д}}$ ;  $E_{\text{н}} = 0$  – ЭДС паузы.

Работоспособность представленной модели импульсного силового преобразователя при симметричном и несимметричном управлении ключами иллюстрируют рис. 1 и рис. 2.

Таким образом, выходные ЭДС преобразователя  $E_{\text{шип}_\alpha}(t)$ ,  $E_{\text{шип}_\beta}(t)$  определяются формированием сигналов управления  $t_{\text{упр}_\alpha}(t)$ ,  $t_{\text{упр}_\beta}(t)$ , которые в случае симметричной коммутации ограничиваются в диапазоне  $[-T_{\text{шип}}/2; T_{\text{шип}}/2]$ , в случае несимметричной коммутации – в диапазоне  $[0; T_{\text{шип}}]$ .

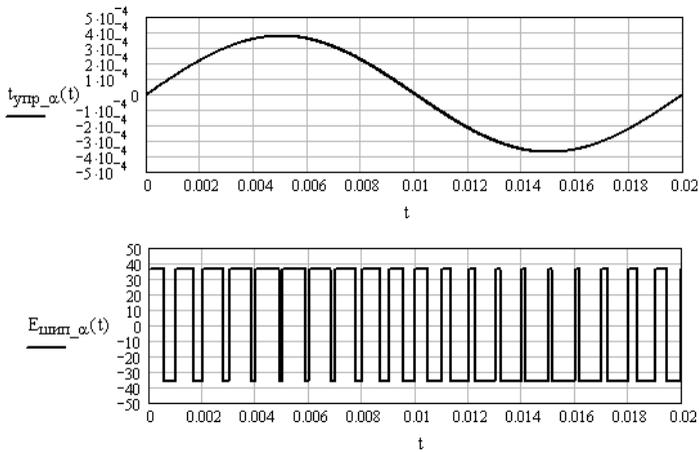


Рис. 1. Временные диаграммы работы двухфазного реверсивного ШИП при симметричной коммутации силовых ключей, полученные с использованием разработанной модели (для оси  $\alpha$ )

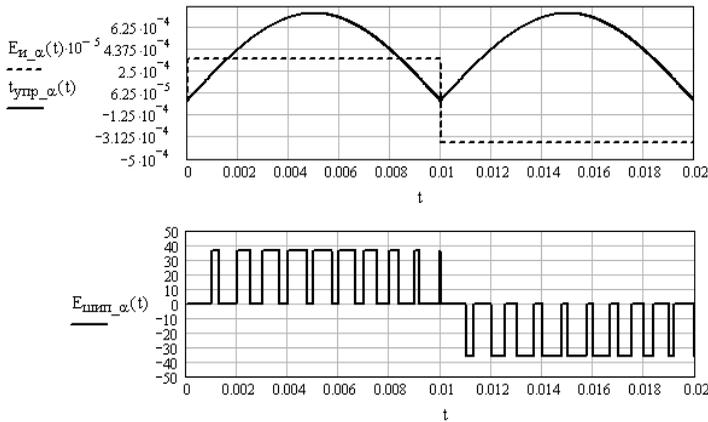


Рис. 2. Временные диаграммы работы двухфазного реверсивного ШИП при несимметричной коммутации силовых ключей, полученные с использованием разработанной модели (для оси  $\alpha$ )

### Литература

1. **Цифровые** электроприводы с транзисторными преобразователями / С.Г. Герман-Галкин [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат: Ленинградское отделение, 1986. – 248 с.
2. **Шурыгин, А.М.** Методы управления импульсно-фазовыми электроприводами машин испытательной техники и их моделирование: монография / А.М. Шурыгин, М.Н. Шурыгин; под ред. Ю.Б. Казакова. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – 156 с.

УДК 621.313

А.В. СТУЛОВ<sup>1</sup>, к.т.н., технический директор;  
И.А. ТРОФИМОВИЧ<sup>1</sup>, главный конструктор;  
А.И. ТИХОНОВ<sup>2</sup>, д.т.н., профессор

<sup>1</sup>ООО «Трансформер», г. Подольск

Московская обл., г. Подольск, ул. Большая Серпуховская, д.43

<sup>2</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

*E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru*

## Современные тенденции в проектировании силовых трансформаторов

**Аннотация.** Рассмотрены современные тенденции трансформаторостроения, подходы к снижению потерь холостого хода трансформаторов. С учетом выявленных тенденций разработана САПР распределительных трансформаторов, ориентированная на малый и средний бизнес.

**Ключевые слова:** тенденции трансформаторостроения, снижение потерь холостого хода, САПР распределительных трансформаторов.

A.V. STULOV<sup>1</sup>, Ph.D., Technical Director;  
I.A. TROFIMOVICH<sup>1</sup>, Chief Designer; A.I. TIKHONOV<sup>2</sup>, professor

<sup>1</sup>Limited Liability Company "Transformer", Podolsk

Moscow Region., Podolsk, ul. Bolshaya Serpuhovskaya, d.43

<sup>2</sup>Ivanovo State Power University named after VI Lenin

153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34

*E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru*

## Modern trends in the design of power transformers

**Abstract.** Modern trends in transformer engineering, approaches to reducing losses of idling of transformers are considered. Taking into account the revealed tendencies, the CAD of distribution transformers, oriented to small and medium business.

**Keywords:** trends in transformer engineering, reduction of losses of idling, CAD of distribution transformers.

В современных рыночных условиях производители электротехнического оборудования, в частности, силовых трансформаторов решают две взаимно направленные задачи: с одной стороны обеспечить надежность и требуемый уровень потерь энергии, с другой стороны, обеспечить минимальную стоимость, соответствующую рыночной конъюнктуре, для победы в конкурентной борьбе.

В России вопросы создания энергоэффективного оборудования регулируются государственной политикой. В [1] изложены требования к уровню потерь холостого хода (XX) и короткого замыкания (КЗ) в энер-

гоэффективных трансформаторах. Производители трансформаторов, ориентированные на экспорт в Европу, руководствуются документом [2], который диктует более жесткие требования к уровню потерь XX и K3 в силовых трансформаторах.

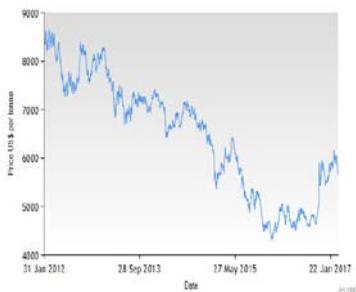


Рис. 1. График динамики цен LME на медь (долл./т) за период 2012-2017 (данные с сайта www.lme.com)

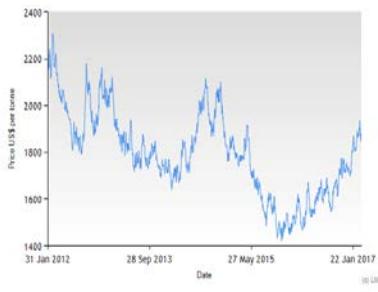


Рис. 2. График динамики цен LME на алюминий (долл./т) за период 2012-2017 (данные с сайта www.lme.com)

Кроме того, на создание оптимальной модели трансформатора влияет текущая цена на материалы. Изменение стоимости активных материалов (рис. 1, рис. 2) значительно влияет на соотношение «вес алюминия (меди)/вес электротехнической стали» при оптимальном проектировании трансформаторов. В связи с этим инженер-проектировщик обязан реагировать на изменение цен на материалы путем изменения баланса «вес алюминия (меди)/вес электротехнической стали», особенно важно учитывать этот момент при заключении долгосрочных контрактов на поставку электротехнического оборудования.

Следует отметить, что для снижения потерь XX в магнитной системе трансформатора используются два подхода:

1. Снижение индукции в стержнях магнитной системы.

2. Использование электротехнической стали (ЭТС) современных марок с пониженными удельными потерями (до 0,75 Вт/кг) и более высокой индукцией насыщения (1,9-2,0 Тл), а также использование сталей с аморфной и нанокристаллической структурой.

Первый подход не является перспективным и влечет за собой увеличение расхода активных материалов и значительное удорожание трансформаторов.

Второй подход является перспективным, т.к. позволяет сохранить габариты трансформаторов в заданных пределах. Фактором, сдерживающим широкое распространение использования ЭТС с пониженными потерями, является уровень технологии производства ЭТС в России (минимальный уровень удельных потерь для российской стали 3409 толщиной 0,27 мм составляет 1,0 Вт/кг)

В связи с этим инженер-проектировщик вынужден использовать стали импортных марок и учитывать более высокую стоимость ЭТС при оптимальном проектировании.

Широкое распространение трансформаторов с сердечниками из аморфной стали также сдерживается состоянием производства аморфной стали в России.

Для решения поставленных задач проектирования силовых трансформаторов с учетом вышеперечисленных технических и экономических факторов была разработана САПР трансформаторов на основе автономных библиотек моделирования физических полей (EMLib – ElectroMagnetics Library) [3] и электрических цепей (ECLib – Equivalent Circuit Library) [4].

Разработанная САПР включает в себя подсистему управления проектом [5], подсистему оптимизации [6], подсистему точного электромагнитного расчета, подсистему уточненного теплового расчета и подсистему формирования трехмерной модели и комплекта чертежей. Данная САПР организована на базе популярных математических пакетов, таких как MS Excel и MATLAB. Для формирования конструкторской документации используется связка Excel и Solidworks. Предлагаемая САПР способна реализовать полный цикл проектирования изделия от постановки задачи и всестороннего инженерного анализа до генерации полного комплекта конструкторско-технологической документации.

Особенностью предлагаемой САПР является возможность прогнозирования изменения цен на материалы в краткосрочном и среднесрочном периоде с применением нейросетевых технологий.

САПР находится в стадии апробации на трансформаторном заводе «Трансформер».

#### Литература

1. **Постановление Правительства РФ** от 17.06.2015 № 600 «Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности»
2. **European Standard EN 50588-1** «Medium power transformers 50 Hz, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV – Part 1: General requirements», June 2015
3. **Тихонов А.И., Булатов Л.Н.** Платформнезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 2011614852. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011
4. **Тихонов, А.И.** Разработка автономной библиотеки моделирования электрических цепей для создания виртуальных лабораторий численного исследования моделей электрических машин/ А.И. Тихонов, А.В. Стулов, Д.Е. Дрязгов // Вестник ИГЭУ. – 2016, №1. – С. 34-39.
5. **Тихонов, А.И.** Управляющая подсистема САПР распределительных трансформаторов. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам

и товарным знакам. № 2015660675. Заявка № 2015617807, приоритет от 25.08.2015, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.10.2015

6. **Тихонов, А.И.** Разработка подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов / А.И. Тихонов, А.С.Зайцев, А.В.Стулов, И.А. Трофимович // Вестник ИГЭУ. – 2014. Вып. 6. – С. 87-91.

УДК 621.313

И.В. ЕРЕМИН, соискатель;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор;  
Г.В. ПОПОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [bkmzzzz@yandex.r](mailto:bkmzzzz@yandex.r), [ait@dsn.ru](mailto:ait@dsn.ru)

### **Расчетная подсистема САПР силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали**

**Аннотация.** Разработана и опробована в производстве расчетная подсистема САПР распределительных трансформаторов с сердечником из аморфной стали. Описан функционал основных подсистем.

**Ключевые слова:** аморфная электротехническая сталь, снижение потерь холостого хода, САПР распределительных трансформаторов.

I.V. EREMIN, applicant;  
A.I. TIKHONOV, Doctor of Technical Sciences, Professor;  
G.V. POPOV, Doctor of Technical Sciences, Professor

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34  
E-mail: [bkmzzzz@yandex.r](mailto:bkmzzzz@yandex.r), [ait@dsn.ru](mailto:ait@dsn.ru)

### **Calculation subsystem of CAD of power transformers with an amorphous steel core**

**Abstract.** The design subsystem of CAD distribution transformers with an amorphous steel core was developed and tested in production. The functional of the main subsystems.

**Keywords:** amorphous electrotechnical steel, reduction of losses of idling, CAD of distribution transformers.

Современные силовые трансформаторы обладают высоким коэффициентом полезного действия, составляющим от 95 до 99,5 %, в зависимости от его мощности. В то же время ежегодное потребление электроэнергии в России находится на уровне 900 миллиардов кВт.ч. При этом общие потери электроэнергии в распределительных трансформаторах оцениваются в 7,5 миллиардов кВт.ч и примерно 50 % от этого – это потери холостого хода. В целом потери холостого хода

составляют около 4 % производимой в России электроэнергии, причем значительная часть потерь приходится на распределительные трансформаторы.

В связи с ростом потребляемых мощностей текущее состояние трансформаторного парка России непрерывно меняется и развивается, где одним из приоритетных направлений является направление, связанное с деятельностью отечественных предприятий, которые выпускают небольшие серии трансформаторов специальных серий, где одну из главных ролей играет стоимость потерь и обслуживания. Например, в трансформаторе мощностью 25 кВА независимо от его нагрузки при 40-летней эксплуатации стоимость этих потерь в стали равна первоначальной стоимости трансформатора.

Одним из приоритетных способов снижения потерь холостого хода связан с использованием сердечников из аморфной стали. В связи с малой толщиной аморфный материал наиболее пригоден для витой конструкции сердечника, т.е. для трансформаторов малой мощности поэтому наибольший экономический эффект достигается при их установке в распределительных и осветительных сетях.

Практически все электромагнитные, механические и потребительские свойства аморфной стали превосходят аналогичные свойства анизотропной электротехнической стали, применяемой в современных трансформаторах, за исключением индукции, составляющей 1,4 Тл и коэффициента заполнения. С другой стороны небольшая индукция даёт возможность снизить уровень шума трансформатора.

Апробированных методик проектирования трансформаторов с сердечником из аморфной стали, аналогичных традиционным методикам проектирования трансформаторов из электротехнической стали, в которой учитывались бы перечисленные выше факторы, не существует. Это значит, что каждый завод, выпускающий такие трансформаторы, полагается на свой собственный опыт и идет на определенный риск.

Поэтому нами была поставлена задача разработки такой методики и создана САПР трансформатора с сердечником из аморфной стали (ТСАС). Пробная версия данной системы была создана в среде MathCad и опробована в учебном проектировании. Это позволило выявить ряд особенностей, которые были учтены при разработке промышленной версии. Расчетная подсистема САПР ТСАС реализована на базе табличного процессора MSExcel (рис. 1). Данные вводятся в интерактивном режиме в табличной форме и отправляются на расчет, который осуществляется с помощью расчетных моделей, написанных с использованием встроенной системы программирования VBA [1, 2].

Уточненный расчет холостого хода осуществляется с использованием конечно-элементной модели магнитного поля, реализованной средствами библиотеки EMLib [3]. Кривая намагничивания стали корректируется с учетом технологического зазора. Коэффициент корректировки уточняется в условиях реального производства [4]. Создан макрос,

позволяющий осуществить построение и исследование полевой модели в интерактивном режиме.

№	Помощь	Имя	Заданное	<< Рекомендация
<b>1. Техническое задание</b>				
4	Способ охлаждения	Cooling	Масляный	
5	Полная мощность трансформатора	S	100000	ВА
6	Номинальное линейное напряжение ОВН	UH	10000	В
7	Номинальное линейное напряжение ОНН	UL	400	В
8	Число ступеней регулирования напряжения	Nstreg	5	
9	Шаг ступени регулирования	Sstreg	2,5	%
10	Способ регулирования напряжения	Reg	ПБВ	
12	Тип обмотки НН	TypeWL	Цилиндр. из прим. провода	
13	Схема соединения на стороне НН	ContectionL	Звезда	
14	Тип обмотки ВН	TypeWH	Цилиндр. из круг. провода	
15	Схема соединения на стороне ВН	ContectionH	Треугольник	
16	Группа соединения	Group	11	
18	Число фаз	m	3	
19	Частота	f	50	Гц
20	Ток холостого хода	i0	0,3	%
21	Напряжение короткого замыкания	uk	4,5	%
22	Потери холостого хода	P0	80	Вт
23	Потери короткого замыкания	Pk	1970	Вт
<b>Материалы и их характеристики</b>				
27	Материал ОНН	MaterialL	Алюминий	
28	Плотность материала ОНН	GammaL	2700	кг/м <sup>3</sup>
29	Удельное сопротивление материала ОНН	Ro115L	3,60E-08	3,86E-08 Ом/м
30	Материал ОВН	MaterialH	Алюминий	
31	Плотность материала ОВН	GammaH	2700	кг/м <sup>3</sup>
32	Удельное сопротивление материала ОВН	Ro115H	3,60E-08	3,86E-08 Ом/м
34	Электротехническая сталь	Steel	Аморфная	3408
35	Толщина стали	Delta	2,50E-05	2,50E-05 м

Рис. 1. Внешний вид расчетной подсистемы САПР ТСАС

Для оптимизации трансформатора разработана непрерывная модель, которая может быть использована в качестве функции цели при использовании методов нелинейного программирования. Оптимизация осуществляется с использованием метода переменной метрики Дэвидона-Флетчера-Пауэлла.

В настоящее время распределительные трансформаторы с магнитопроводом из аморфной стали изготавливаются в США, Японии, Китае, Германии, налаживают производство в России и Франции. Пробный выпуск данных трансформаторов был осуществлен и на Подольском трансформаторном заводе ООО «Трансформер», где и была опробована описанная здесь САПР ТСАС.

### Литература

1. **Еремин И.В., Попов Г.В., Тихонов А.И.** Особенности реализации подсистемы оптимизации в САПР трансформаторов с сердечником из аморфной стали – Иваново: «Вестник ИГЭУ», 2014, Вып. 5. – с. 27 – 31.
2. **Еремин И.В., Попов Г.В., Тихонов А.И.** К вопросу о проектировании распределительных трансформаторов из аморфной стали // 2-я Всероссийская науч.-практич. конф. «Новые технологии в промышленности, науке и образовании» / под общей ред. И.П. Белова. – Оренбург: Изд-во ООО «Золотой кардинал», 2011. – с. 111 – 112.
3. **Тихонов А.И., Булатов Л.Н.** Платформенезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. –№ 2011614852. Заявка № 2011613040, приоритет от 28.04.2011, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011.
4. **Тихонов А.И., Попов Г.В., Еремин И.В.** Особенности методики расчета холостого хода трансформатора с сердечником из аморфной стали. - Иваново: «Вестник ИГЭУ», 2013, Вып. 4. – с. 32 – 35.

УДК 621.313

А.В. ПОДОБНЫЙ, студент;  
Д.М. КОМЛЕВ, студент;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: [aleksandr.rash@mail.ru](mailto:aleksandr.rash@mail.ru), [ait@dsn.ru](mailto:ait@dsn.ru)

## Разработка системы дистанционного управления трансформаторной подстанцией

**Аннотация.** Рассмотрена технология дистанционного управления трансформаторной подстанцией на платформе Arduino. Технология может быть использована для автоматизации экспериментальных исследований электромеханических устройств.

**Ключевые слова:** система управления трансформаторной подстанцией, дистанционное управление электромеханическими устройствами, платформа Arduino.

A.V. PODOBNY, student;  
D.M. KOMLEV, student;  
A.I. TIKHONOV, professor

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34  
*E-mail: aleksandr.rash@mail.ru, ait@dsn.ru*

## Development of a remote control system for a transformer substation

**Abstract.** The technology of remote control of the transformer substation on the Arduino platform is considered. The technology can be used to automate experimental studies of electromechanical devices.

**Keywords:** Control system of transformer substation, remote control of electro-mechanical devices, platform Arduino.

Одной из актуальных проблем эксплуатации распределительных трансформаторных подстанций является проблема разработки относительно дешевых систем дистанционного управления оборудованием. Поэтому была поставлена задача создания технологии удаленного управления электромеханическими устройствами, которая может быть использована при эксплуатации данных устройств, так и при разработке испытательных стендов, в том числе учебных лабораторных установок, работу с которыми можно осуществлять удаленно.

Современные тенденции развития компьютерных технологий требуют использования кроссплатформенных приложений, в связи с чем было решено использовать Web-технологии.

Программное обеспечение (ПО) системы управления включает в себя две части: серверную и клиентскую, которые непосредственно взаимодействуют между собой.

Клиентская часть (Front-end) включает в себя три составляющие:

- язык гипертекстовой разметки HTML (HyperText Markup Language);
- каскадная таблица стилей CSS (Cascading Style Sheets) - формальный язык описания внешнего вида документа, написанного с использованием языка разметки;
- клиентский язык JavaScript (прототипно-ориентированный сценарный язык программирования, выполняемый на стороне клиента).

С помощью HTML и CSS формируется удаленный интерфейс взаимодействия с объектом. Непосредственно сама html страница в режиме реального времени (Real-time RTC) отражает состояние объекта. Объект представлен с помощью масштабируемой векторной графики, в формате SVG (Scalable Vector Graphics), что позволяет работать с изображением напрямую, через язык java script. С помощью CSS обеспечивается удобная и понятная внешняя визуализация объекта.

С помощью языка JavaScript осуществляется динамическая работа (манипуляция) со статической страницей на клиентской стороне. Также происходит формирование определённого объема (пакета) данных для последующей передачи их на сервер. Передача на сервер происходит без перегрузки страницы за счет использования современной технологии AJAX (Asynchronous Javascript and XML), которая в асинхронном режиме обращается к серверу для точечного получения информации, а не запрашивает всю информацию по странице полностью.

Взаимодействие между клиентской и серверной частью осуществляется по расширению протокола HTTP - HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure), в отличие от простого HTTP, работающий через криптографические протоколы SSL и TLS. В настоящее время данный протокол обеспечивает надежный защищенный канал связи для передачи данных. Поскольку управляемый объект является стратегическим, его максимальная защита является одной из основных задач решаемого проекта. В настоящее время данную технологию защиты используют такие требовательные к защите данных Интернет-ресурсы, как например «Сбербанк», и МВД РФ (<https://мвд.рф>, <https://online.sberbank.ru>).

Серверная часть (Back-end) состоит из следующих элементов.

Аренда серверного пространства (СП). В рассматриваемом проекте в качестве СП использовался хостинг-провайдер, предоставляющий такие технологические возможности как (PHP 5.3, Apache, MySQL, FTP, т.д.)

Работа на серверной части заключается в разработке алгоритма программы на скриптовом языке общего назначения, применяемого для разработки веб-приложений PHP (Hypertext Preprocessor)

Алгоритм работы сервера делится на три основных этапа: идентификация пользователя через базу данных; изменение состояния объекта по факту полученной информации от клиента, с дальнейшим обязательным уведомлением клиента о статусе выполнения задачи; формирование пакета данных для последующего взаимодействия с микропроцессорным устройством (МУ) на базе процессора Atmel ATmega 2560-16AU.

На управляемом объекте (рис. 1) устанавливается система распознавания и преобразования сигнала, передаваемого через сетевые протоколы TCP/IP (Transmission Control Protocol&Internet Protocol). Система основана на технологии ведущего ведомых устройств (Master-Slave), где только ведущее устройство может самостоятельно запрашивать данные у ведомых устройств, или рассылать широкоэвещательные сообщения. Ведомые устройства собирают информацию об отдельных элементах объекта, анализируют ее, и передают по запросу мастеру, который в свою очередь составляет общую информацию об объекте, проводит анализ аномальных отклонений, и отправляет предварительно обработанную для оптимизации передачи пакета данных через GSM модем на сервер. Связь между устройствами организована по промышленному стандарту физического уровня для асинхронного

интерфейса RS-485 (Recommended Standard), позволяющему иметь до 32 приёмопередатчиков в одном сегменте сети максимальной длины до 1200 метров, с максимальным количеством узлов в сети – 256.

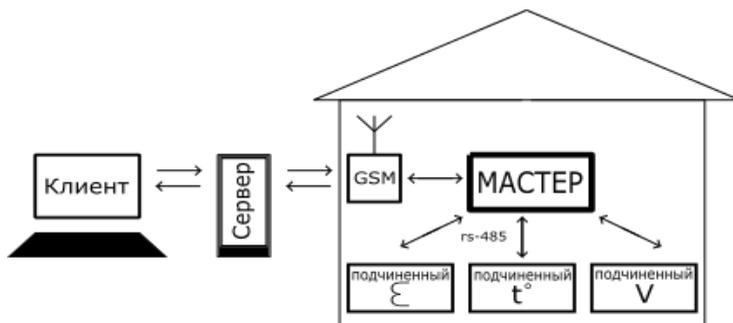


Рис. 1. Схема обмена данными в системе дистанционного управления трансформаторной подстанцией

Ведомое устройство представляет из себя МУ на базе микросхемы Atmel ATmega328, ЦАП преобразователя сигналов, и модуля преобразователя интерфейсов UART TTL - RS-485 на микросхеме MAX485.

Ведущее устройство представляет из себя МУ на базе процессора Atmel ATmega2560-16AU, GSM модем на базе модуля NEOWAY M590 с поддержкой GPRS class 10, модуля преобразователя интерфейсов UART TTL - RS-485, разъем для flash-карты SD (Secure Digital Memory Card).

Система управления на объекте автономна, имеет бесперебойный источник резервного питания БИРП 12/1,6 поддерживает дистанционное обновление прошивки, ведется журнал событий, как на сервере, так и в самом устройстве на Flash-карту.

Программа для управления системой написана на языке СИ, с помощью аппаратно-программного комплекса с полностью открытой архитектурой для построения систем автоматики - Arduino. Для работы были использованы такие библиотеки как TimerThree – библиотека прерываний, и SoftwareSerial – библиотека для работы с виртуальным портом.

Данную технологию можно применить для дистанционного управления любыми электромеханическими устройствами, в частности ведется разработка на основе данной платформы автоматизированного испытательного стенда для исследования универсального коллекторного двигателя (УКД).

УДК 621.313

К.В. СЕМЕНОВА, к.т.н., старший преподаватель;  
И.А. ПАЙКОВ, аспирант;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор;

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: skv1\_70@mail.ru, komned37@yandex.ru, ait@dsn.ru*

### **Расчет динамических режимов силового трансформатора на основе нелинейной модели магнитной цепи**

**Аннотация.** Рассмотрены особенности реализации динамических режимов трехфазного трансформатора с учетом нелинейности магнитной цепи. Разработанная модель реализована в САПР распределительных трансформаторов в подсистеме расчета электродинамических усилий в обмотках в режиме короткого замыкания.

**Ключевые слова:** динамический режим трансформатора, нелинейная магнитная цепь, расчет электрической цепи.

K.V. SEMYONOVA, Ph.D.; I.A. PAIKOV, graduate student;  
A.I. TIKHONOV, Prof.

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters,  
153040, Ivanovo, Stroiteley Ave., 33  
Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34  
*E-mail: skv1\_70@mail.ru, komned37@yandex.ru, ait@dsn.ru*

### **Calculation of the dynamic mode of power transformer based on the nonlinear model of the magnetic circuit**

**Abstract.** The features of the implementation of dynamic modes of three-phase transformer based on nonlinear magnetic circuit. The developed model is implemented in the CAD system of transformers in the subsystem of calculation of electrodynamic forces in the windings in regime of short-circuited.

**Keywords:** dynamic mode transformer, nonlinear magnetic circuit, the calculation of the electrical circuit.

Расчет динамических режимов работы трансформатора является одной из актуальных задач, возникающих при проектировании. На основании данного расчета, в частности может быть осуществлен расчет электродинамических усилий, возникающих в обмотках трансформатора в режиме короткого замыкания. Поэтому в составе подсистемы расчета обмоток трансформатора на электродинамическую устойчивость САПР распределительных трансформаторов, разрабаты-

ваемой в ИГЭУ, была реализована нелинейная динамическая модель, которая автоматически формируется и рассчитывается на основе результатов проектного расчета трансформатора.

Динамическая цепная модель трансформатора строится на основе схемы замещения магнитной цепи, изображенной на рис. 1, расчет которой осуществляется по методу узловых потенциалов. При этом вектор магнитных потоков стержней

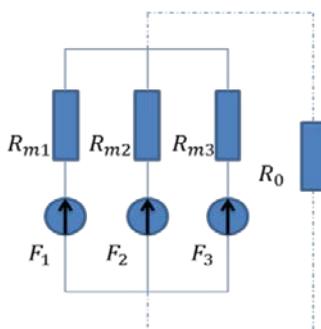


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи трансформатора

$$\Phi = \Lambda(\mathbf{F} - U_m) = \Lambda \mathbf{F} - \frac{1}{\sum_{k=1}^3 \Lambda_k + \Lambda_0} \Lambda^2 \mathbf{F}, \quad (1)$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица магнитных проводимостей ветвей;  $\mathbf{F}$  – вектор намагничивающих сил (НС) стержней;  $U_m$  – магнитное напряжение.

НС  $k$ -го стержня трансформатора определяется как

$$F_k = i_{1k} W_1 + i_{2k} W_2, \quad (2)$$

где  $i_{1k}$ ,  $i_{2k}$  – мгновенные значения токов первичной и вторичной обмоток, расположенных на  $k$ -м стержне;  $W_1$ ,  $W_2$  – число витков ОВН и ОНН.

Магнитная проводимость  $k$ -й ветви определяется как

$$\Lambda_k = \frac{1}{R_{mk} + 2R_{m\tau 3}} = \frac{1}{v(H_k) \frac{L_k}{S} + 2 \frac{\delta_{\tau 3}}{\mu_0 \sqrt{2} S}}, \quad (3)$$

где  $R_{mk}$  – магнитное сопротивление  $k$ -й ветви;  $v(H_k)$  – удельное магнитное сопротивление  $k$ -й ветви;  $H_k$  – напряженность магнитного поля;  $S$  – активное сечение стержня и ярма трансформатора;  $L_k$  – длина средней силовой линии магнитного поля  $k$ -й ветви;  $\delta_{\tau 3}$  – расчетный технологический зазор.

Магнитная проводимость поля нулевой последовательности  $\Lambda_0$  для трансформаторов со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_n$  может быть рассчитана из известного условия  $X_0 \approx X_1$  как

$$\Lambda_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{\Phi_{k1}}{F_1} = \frac{U_{kp1}}{4,44f W_1 I_1 W_1} \frac{1}{100} = \frac{U_1}{4,44f W_1^2 I_1} \frac{u_{kp}}{100}, \quad (4)$$

где  $X_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки;  $\Phi_{k1}$  – максимальное значение потока рассеяния первичной обмотки;  $u_{kp}$  –

реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %;  $U_1, I_1$  – действующие значения фазного напряжения и фазного тока.

Зависимость  $v(H_k)$  строится на основе кривой намагничивания стали  $B(H)$  и аппроксимируется сплайнами.

Математическая модель динамических режимов трансформатора может быть представлена системой уравнений

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i} = \mathbf{L}^{-1} (\mathbf{u} - \mathbf{Ri}), \quad (5)$$

где  $\mathbf{i}, \mathbf{u}$  – векторы мгновенных токов и напряжений в обмотках;  $\mathbf{L}, \mathbf{R}$  – квадратные матрицы индуктивностей и сопротивлений.

Элементы матрицы  $\mathbf{L}$  рассчитываются на каждом шаге интегрирования системы уравнений (5) по формуле

$$L_{p,q} \approx \frac{\Delta \Phi_s}{\Delta F_k} W_p W_q + (L_p) \Big|_{\text{при } p=q}, \quad (6)$$

где  $\Delta \Phi_s$  – приращение магнитного потока s-го стержня, на котором располагается p-я обмотка;  $\Delta F_k$  – приращение НС k-го стержня, на котором располагается q-я обмотка;  $L_p$  – индуктивность рассеяния p-й обмотки.

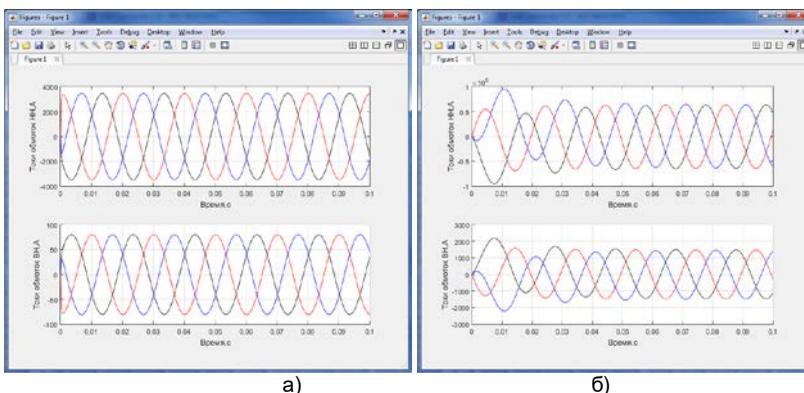


Рис. 2. Результаты расчета динамических режимов трансформатора ТМГ-1000-10/0,4 при включении трансформатора на номинальную нагрузку (а) и на короткое замыкание (б)

При расчете элементов матрицы  $\mathbf{L}$  сначала при текущих мгновенных значениях токов обмоток по (2) рассчитываются намагничивающие силы стержней  $F$ , затем по (1) рассчитываются магнитные потоки стержней  $\Phi$  (при этом нелинейная задача решается методом Ньютона). Затем рассчитываются приращения потоков стержней  $\Delta \Phi_s$ . Для этого

каждому значению намагничивающей силы стержня поочередно дается приращение  $\Delta F_k$ , после чего вновь рассчитывается магнитная цепь. При этом расчет магнитной цепи осуществляется в линейной постановке при неизменных значениях магнитных сопротивлений стержней, что существенно уменьшает время расчета.

Результаты расчета токов в обмотках при включении трансформатора на номинальную нагрузку и на трехфазное короткое замыкание приведены на рис. 2.

УДК 621.313

М.В. ТАМЬЯРОВА, старший преподаватель;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор;  
А.В. ГУСЕНКОВ, к.т.н., доцент

Филиал ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет»  
446001, Самарская область, г. Сызрань, ул. Советская, д. 45  
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: stprepod@mail.ru, ait@dsn.ru*

### **Универсальная нелинейная полевая динамическая модель электрической машины в среде Simulink**

**Аннотация.** Рассмотрен принцип построения универсальной нелинейной динамической модели электрической машины, способной интегрироваться с имитационным пакетом Simulink. Модель отличается от известных цепных моделей использованием аппроксимации результатов предварительной серии полевых расчетов, что позволяет достичь универсальности и точности расчетов, характерной для полевых моделей, при скорости, характерно для цепных моделей.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, расчет магнитного поля, полевая динамическая модель электрической машины, моделирование в Simulink.

M.V. TAM'JAROVA, senior lecturer;  
A.I. TIKHONOV, professor;  
A.V. GUSENKOV, associate professor  
Branch VPO «Samara State Technical University», Syzran, Russian Federation  
446001, Samara region, Syzran, st. Sovetskaya, d. 45  
Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34  
*E-mail: stprepod@mail.ru, ait@dsn.ru*

### **Universal field nonlinear dynamic model of the electric machine in the Simulink**

**Abstract.** The principle of construction of a universal non-linear models of the dynamics of the electric machine that can be integrated with the simulation package Simulink. In the model is used the approximation results of the preliminary series of

field calculation, which allows for flexibility and accuracy of the calculations, characteristic of field models, at a rate characteristic of the chain models.

**Keywords:** finite element method, calculation of the magnetic field, the field dynamic model of the electric machine, simulation in Simulink.

При моделировании электрических машин с использованием пакета имитационного моделирования MatLab Simulink часто используется библиотека SimPowerSystems. Однако модели, предоставленные в данной библиотеке, построены с учетом значительного количества ограничений. Одной из актуальных задач в области моделирования электрических машин является разработка динамических моделей, опирающихся на результаты расчета физических полей, что позволяет учесть многие особенности их конструкции. Однако расчет динамических режимов машин в полевой постановке требует значительного времени. Поэтому имеет смысл искать варианты моделирования, позволяющие совмещать в себе достоинства полевых моделей с высоким быстродействием цепных моделей.

Система дифференциальных уравнений динамики произвольной электрической машины имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{u} - \mathbf{R}\mathbf{i}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_b), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Psi$  – вектор потокосцеплений обмоток или контуров с током;  $\mathbf{u}$  – вектор мгновенных напряжений;  $\mathbf{R}$  – матрица сопротивлений;  $\mathbf{i}$  – вектор мгновенных токов;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $M$  – электромагнитный момент;  $M_b$  – момент внешних сил;  $J$  – момент инерции.

Используя разложение

$$\frac{d\Psi_k}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Psi_k}{\partial i_j} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_k}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^n L_{kj} \frac{di_j}{dt} + C_k \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2)$$

можно привести систему уравнений (1) к форме

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{i\} \\ \alpha \\ \omega \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [L] & \{C\} & \{0\} \\ [0] & 1 & 0 \\ [0] & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \omega \\ \frac{M - M_b}{J} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [R] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{i\} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \right), \quad (3)$$

где  $\{i\}$  – вектор мгновенных токов;  $\{u\}$  – вектор мгновенных напряжений;  $[0]$ ,  $\{0\}$  – соответственно матрица-строка и матрица-вектор, за-

полненные нулями;  $[L]$  – квадратная матрица индуктивностей, элементы которой рассчитываются по формуле

$$L_{kj} = \frac{\partial \Psi_k}{\partial I_j} \approx \frac{\Delta \Psi_k}{\Delta I_j}; \quad (4)$$

$\{C\}$  – вектор, определяющий наводимую в контурах ЭДС вращения, элементы которого рассчитываются по формуле

$$C_k = \frac{\partial \Psi_k}{\partial \alpha} \approx \frac{\Delta \Psi_k}{\Delta \alpha}. \quad (5)$$

Элементы матриц  $[L]$  и  $\{C\}$  рассчитываются в ходе серии расчетов магнитного поля при различных сочетаниях значений токов и различных положениях ротора относительно статора. При расчете приращений потокоцеплений  $\Delta \Psi_k$  магнитные проницаемости всех элементов конечно-элементной сетки расчетной области машины принимаются неизменными по отношению к исходному состоянию, полученному на данном шаге интегрирования.

На рис. 1 представлена модель двигателя постоянного тока, построенная средствами SimPowerSystems в среде Simulink. Матрица коэффициентов формируется из элементов, определяемых по заданным в табличной форме матрицам. Набранные таким образом матрицы-столбцы объединяются в единую квадратную матрицу коэффициентов в блоке Matrix.

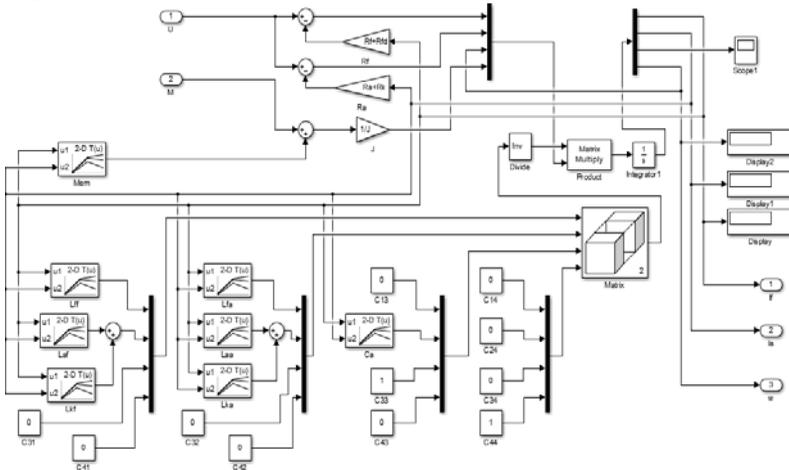


Рис. 1. Полевая динамическая модель двигателя постоянного тока

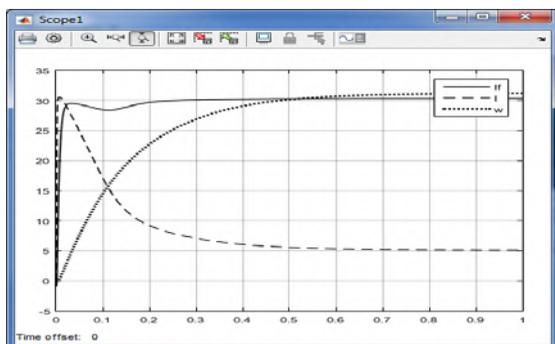


Рис. 2. Кривые разгона двигателя постоянного тока, вычисленные по полевой динамической модели

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты моделирования пуска двигателя постоянного. Данные кривые отличаются от аналогичных кривых, полученных по упрощенным инженерным моделям.

Быстродействие описанной полевой динамической модели сопоставимо с временем расчета традиционных упрощенных моделей.

Так как полевая динамическая модель реализована средствами пакета MatLab Simulink, то она может быть использована при моделировании систем управления электроприводами. Описанная технология может быть реализована на базе любого открытого имитационного пакета.

УДК 621.313

И.А. КОРНЕВ, ассистент;  
М.В. ТАМЬЯРОВА, старший преподаватель;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
Филиал ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет»  
446001, Самарская область, г. Сызрань, ул. Советская, д. 45  
E-mail: kornevispu@gmail.com, stprepod@mail.ru, ait@dsn.ru

### **Технология проектирования электрических машин с использованием библиотек моделирования магнитного поля и электрических цепей**

**Аннотация.** Рассмотрена технология организации процесса проектирования электрических машин произвольной конструкции с использованием разработанных авторами библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля и библиотеки моделирования электрической цепи. Особенность моделей состоит в возможности их оперативной генерации по условиям эксперимента.

**Ключевые слова:** САПР электрических машин, расчет магнитного поля, расчет электрической цепи, полевая динамическая модель электрической машины.

I.A. KORNEV, assistant;  
M.V. TAMJAROVA, senior lecturer;  
A.I. TIKHONOV, professor

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34  
Branch VPO «Samara State Technical University», Syzran, Russian Federation  
446001, Samara region, Syzran, st. Sovetskaya, d. 45  
*E-mail: kornevispu@gmail.com, stprepod@mail.ru, ait@dsn.ru*

## Technology for designing electrical machines using magnetic field modeling libraries and electrical circuits

**Abstract.** The technology of the organization of the design process of electrical machines of any design using a library of the finite element modeling of the magnetic field and the electrical circuit simulation library. Feature of models is the ability to generate their in accordance with the conditions of the experiment.

**Keywords:** CAD electrical machines, the magnetic field calculation, the calculation circuit, field dynamic model of the electric machine.

Одной из определяющих особенностей современного производства электрических машин является рост спроса на мелкие партии машин различных исполнений, в том числе нетрадиционных, зачастую в условиях отсутствия апробированных методик проектирования и времени на проведение НИОКР и создание опытных образцов. При этом повышаются требования к оптимальности проекта. Все это приводит к необходимости совершенствования используемых математических моделей. Поэтому необходимым элементом современных САПР являются системы инженерного анализа (CAE – Computer-Aided Engineering), основанные на использовании конечно-элементных моделей физических полей, комбинируемых с цепными динамическими моделями. Одним из главных недостатков современных CAE-систем (ANSYS Maxwell, Comsol Multiphysics, EICut и т.п.) является их относительная закрытость, что затрудняет использование результатов расчета в прикладных задачах САПР. Поэтому актуальной является задача разработки подсистем функционального проектирования САПР, основанных на автономных библиотеках, способных реализовать функции инженерного анализа.

Особенности разрабатываемой в ИГЭУ технологии проектирования электрических машин рассмотрим на примере проекта машины постоянного тока невполюсной конструкции. Новая технология базируется на популярном табличном процессоре MSExcel, в который внедряются две авторские динамически подключаемые библиотеки:

- 1) EMLib – библиотека конечно-элементного моделирования двумерных физических полей;
- 2) ECLib – библиотека моделирования электрических цепей методом переменных состояния.

Данные библиотеки поставляют в макросы MSExcel, написанные на языке VBA набор функций, позволяющих;

- 1) генерировать соответствующие модели по заданному алгоритму и набору параметров;
- 2) осуществлять расчет соответствующей модели в разных режимах по заданным алгоритмам;
- 3) выдавать результаты расчета в визуальной и цифровой форме для дальнейшего анализа по заданному алгоритму.

Данный функционал позволяет создавать параметрические генераторы соответствующих моделей и программы их исследования.

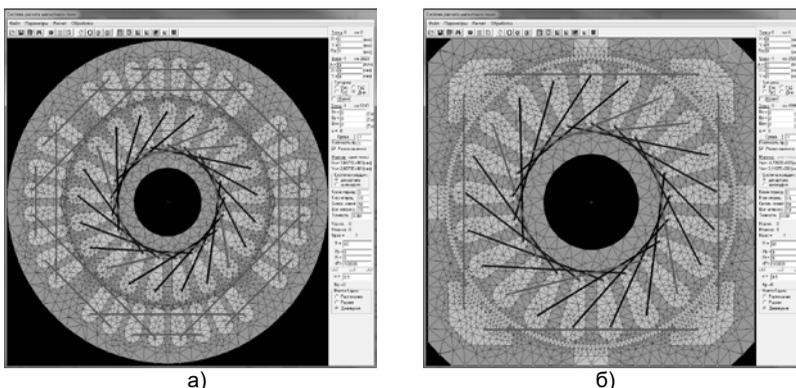


Рис. 1. Конечно-элементные модели машины постоянного тока, созданные с помощью УПГ КЭМ ЭМ с использованием функционала библиотеки EMLib

В частности, одной из типовых задач проектирования, которая реализуется в настоящее время, является задача структурной оптимизации электрической машины. Для этого разрабатывается универсальный параметрический генератор конечно-элементной модели электрической машины (УПГ КЭМ ЭМ) произвольной конструкции, представляющий собой программный код, обращающийся к библиотеке пазов статора и ротора и к библиотеке стандартных технологических элементов, из которых автоматически комбинируется конечно-элементная модель машины. В частности, на рис 1,а представлена модель традиционной неявнополюсной машины постоянного тока (МПТТ), а на рис. 1,б - нетрадиционная конструкция МПТТ. Обе модели сформированы УПГ КЭМ ЭМ.

В настоящее время ведется работа по созданию мобильной математической библиотеки, ориентированной на задачи поискового характера, которая будет поставлять в базовые приложения функции поиска оптимального решения с использованием методов нелинейного программирования и генетических алгоритмов. Использование данной библиотеки в комбинации с УПГ КЭМ ЭМ позволит решать задачи

оптимизации структуры МПТ. Сегодня данная задача решается с использованием библиотеки генетических алгоритмов MatLab.

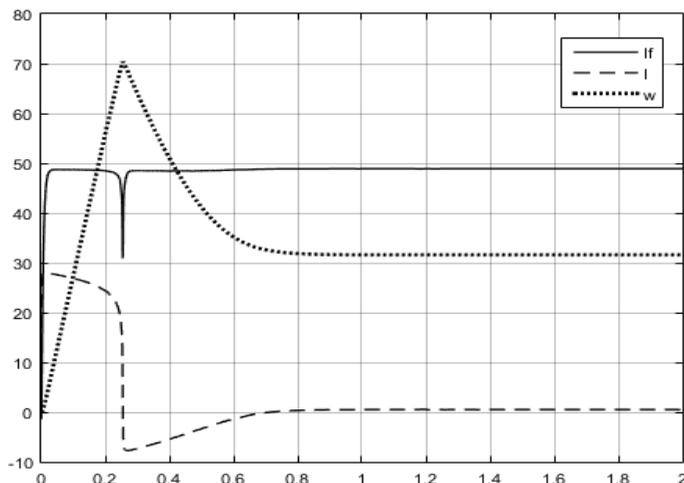


Рис. 2. Кривые разгона ДПТ нетрадиционной конструкции

Использование библиотеки цепей ECLib в комбинации с моделями библиотеки EMLib позволяет организовать программу численного исследования спроектированной машины в динамике. Это позволяет, в частности, выявить проблемы проекта, которые невозможно оценить с использованием методик анализа установившихся режимов работы.

Так, например, МПТ, модель которой представлена на рис. 1,б, обеспечивающая удовлетворительные характеристики в установившемся режиме, демонстрирует плохие динамические свойства, что следует из анализа кривых разгона машины, рассчитанных с использованием полевой динамической модели.

Библиотека ECLib может использоваться также и для решения более сложных задач. В частности, в настоящее время ведется работа по созданию математической модели коммутации в МПТ, которая позволит оценить искрение на коллекторе машины без создания опытного образца. Особенность данной модели состоит в динамической перегенерации цепной модели машины в процессе интегрирования уравнений динамики с одновременным расчетом параметров цепной модели по результатам расчета магнитного поля с использованием библиотеки EMLib.

УДК 621.313

Д.М. СЕВРЮГОВ, аспирант;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: zeron88@yandex.ru, ait@dsn.ru*

### **Имитационные методы моделирования стационарных физических полей, адаптированные к технологии параллельных вычислений**

**Аннотация.** Рассмотрены варианты метода Монте-Карло, адаптированные к технологии параллельных вычислений, которые могут быть использованы для имитационного расчета физических полей.

**Ключевые слова:** расчет стационарных физических полей, имитационные модели, метод Монте-Карло, технология параллельных вычислений.

D.M. SEVRYUGOV, applicant;  
A.I. TIKHONOV, Prof.

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34  
*E-mail: zeron88@yandex.ru, ait@dsn.ru*

### **Simulation methods for modeling stationary physical fields, adapted to the technology of parallel computations**

**Abstract.** Variants of the Monte Carlo method adapted to the parallel computing technology that can be used to simulate physical fields.

**Keywords:** calculation of stationary physical fields, simulation models, Monte Carlo method, parallel computing technology.

Под имитационными моделями понимаются модели, в которых реализуется алгоритмы поведения объектов, соответствующие нашим представлениям о физике моделируемых процессов. При этом данные алгоритмы могут отличаться от общепринятых представлений. Типичные имитационные алгоритмы могут быть построены на основе методов математической статистики. Достоинством таких моделей является простота их адаптации к технологиям параллельных вычислений.

Имитационные модели физических полей можно условно разделить на две группы: методы имитации полей потоками частиц и течением непрерывной среды (жидкости). В первом случае объектами статистики являются частицы, движущиеся по определенным алгоритмам в пространстве расчетной области, во втором – ячейки пространства, заполненные условной жидкостью, обменивающиеся этой жидкостью по определенным правилам с соседними ячейками. Теоретическое обоснование методов второй группы строится на анализе особенностей изменения макропараметров в моделях первой группы.

Методы имитации полей потоком частиц можно разделить на методы с прямолинейной траекторией излучаемых частиц и методы с броуновской (случайной) траекторией движения.

В первом случае уравнение непрерывности имеет вид

$$\vec{\nabla} \cdot (C\vec{v}) = \frac{dC}{dt}, \quad (1)$$

где  $\vec{v}$  – уловная скорость частиц, которая остается постоянной;

$C = \frac{1}{dV} \sum_{i=1}^{dN} (M_i)$  – концентрация частиц в данной элементарной области  $dV$ ;  $M_i$  – условная масса частицы.

Фиксируя количество  $dN$  и скорость  $\vec{v}_i$  и массу  $M_i$  частиц в каждой элементарной области  $dV$  можно рассчитать напряженность поля

$$\vec{E} = \frac{1}{m_E} C\vec{v} = \frac{1}{m_E} \cdot \frac{1}{dV} \sum_{i=1}^{dN} (M_i \vec{v}_i), \quad (2)$$

где  $m_E$  – масштабный коэффициент.

В ячейках, заполненных средой, имитируется возникновение наведенных источников поля, которые сами становятся источниками частиц.

Это приводит к лавинообразному росту количества частиц. В качестве достоинства данного метода можно отметить возможность решения задач без граничных условий. В частности, на рис. 1 приведена кривая (пунктирная линия) распределения величины векторного магнитного потенциала магнитного тока, созданного проводником с током. Данная кривая совпадает с результатами аналитического расчета.

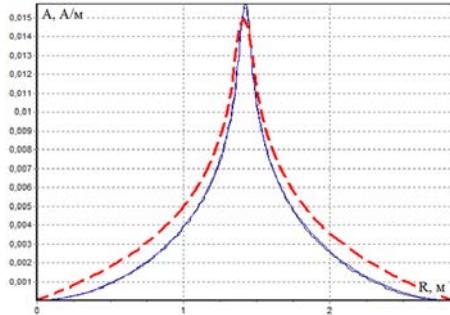


Рис. 1. Распределение значений векторного магнитного потенциала в поле, созданного проводником с током

При имитации полей частицами со случайной траекторией движения уравнение непрерывности имеет вид

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \frac{dC}{dt}, \quad (3)$$

где  $\vec{J} = \frac{1}{dS \cdot dt} \left( \sum_{i=1}^{dN_+} M_i - \sum_{j=1}^{dN_-} M_j \right) \vec{n}$  – плотность потока частиц через поверхность  $dS$ .

При переходе частиц из одной среды в другую оценивается вероятность ее прохождения или отражения от границы в зависимости от параметров среды по обе ее стороны. Граничные условия имитируются свободным или вероятностным выходом частиц за пределы области или их отражением. В качестве достоинства данного метода можно отметить, что в отличие от метода с прямолинейным движением частиц, он ведет себя более устойчиво, особенно в задачах с заданными граничными условиями, например, в случае электрических машин с замкнутой магнитной системой. Однако в открытых задачах возникают погрешности. Например, на рис. 1 решение данным методом представлено сплошной линией. Данная кривая совпадает с результатами расчета магнитного поля методом конечных элементов.

Один из методов, основанных на потоках условной жидкости на квадратной сетке, является предельным вариантом метода, основанного на броуновском движении частиц, когда траектория выстраивается вдоль осей координат с шагом, равным шагу сетки. На рис. 1 решение данным методом также представлено сплошной линией.

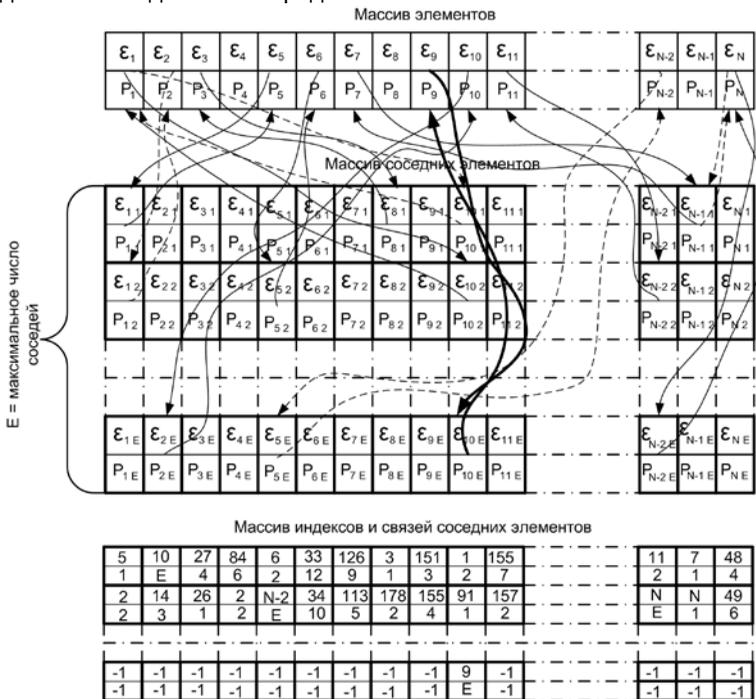


Рис. 2. Распределение адресного пространства на графической карте для ускорения алгоритмов имитации физических полей потоками частиц

При распараллеливании алгоритмов имитации физических полей с использованием многопроцессорной графической карты NVIDIA применялась схема распределения памяти, представленная на рис. 2.

УДК 621.313

А.В. ЛИХАЧЕВА, старший преподаватель;  
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: anna@em.ispu.ru, ait@dsn.ru*

### **Реализация метода электрических сеток на базе современных вычислительных технологий**

**Аннотация:** Рассмотрен вариант метода сеток, реализованного на цифровом компьютере с использованием библиотеки моделирования электрических цепей. Данный метод используется для расчета магнитного поля в подсистеме поверочного расчета САПР распределительных трансформаторов.

**Ключевые слова:** метод сеток, расчет магнитного поля, расчет электрической цепи, САПР силовых трансформаторов.

A.V. LIKHACHEVA, senior lecturer; A.I. TIKHONOV, professor;

Ivanovo State Power University named after VI Lenin  
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34  
*E-mail: anna@em.ispu.ru, ait@dsn.ru*

### **Implementation of the method of electric grids on the basis of modern computing technologies**

**Abstract:** A variant of the grid method realized on a digital computer using a library for modeling electric circuits is considered. This method is used to calculate the magnetic field in the CAD of the distribution transformers.

**Keywords:** method of grids, calculation of the magnetic field, calculation of the electrical circuit, CAD of power transformers.

Для моделирования с использованием электрических схем замещения в свое время широко использовались аналоговые вычислительные машины (АВМ), позволявшие имитировать вычислительные операции над аналоговыми величинами. Одним из методов моделирования физических полей, которые были популярны в эпоху АВМ, был метод электрических сеток [1], построенный на идее замены конечно-разностных сеток электрической сеткой, процессы в которой описываются уравнениями, подобными уравнениям метода конечных разностей

(МКР). Разные варианты метода сеток позволяют решать задачи моделирования поля более эффективно, чем традиционный МКР, если учесть некоторые особенности и симметрии расчетной области и картины поля. В частности, одним из вариантов методов моделирования электрических машин на основе сеточных аналогий является разработанный в МЭИ метод проводимостей зубцовых контуров.

После того, как АВМ были вытеснены цифровыми компьютерами, многие наработки теории моделирования на АВМ были забыты. Однако появились цифровые имитаторы АВМ, такие как MatLab Simulink, что позволяет на новом уровне вернуться к аналоговому моделированию.

Основным недостатком полевых моделей является значительное время расчета, что ограничивает использование данных методов в задачах оптимизации и расчета динамики электрических машин. Поэтому цепные методы расчета остаются актуальными. Использование различных вариантов разветвленных электрических схем замещения физических процессов различной природы позволяет разрабатывать модели, точность которых не уступает полевым моделям, а быстродействие сопоставимо с быстродействием цепных моделей.

В качестве примера рассмотрим вариант метода сеток [2], который может быть использован для расчета стационарного магнитного поля в силовом трансформаторе. Расчетная область задачи разбивается на ячейки, в пределах которой строится типовая электрическая схема, состоящая из магнитных сопротивлений

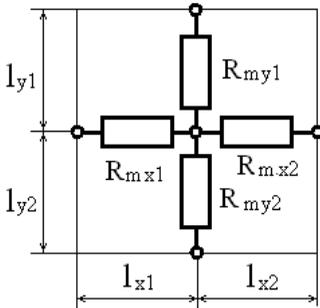


Рис. 1. Элемент электрической сетки в двумерной полевой задаче

(рис. 1), определяемых по формулам

$$R_{my1} = \frac{\nu_{y1}(B_{y1})l_{y1}}{l_{\delta}(l_{x1} + l_{x2})}, \quad R_{my2} = \frac{\nu_{y2}(B_{y2})l_{y2}}{l_{\delta}(l_{x1} + l_{x2})},$$

$$R_{mx1} = \frac{\nu_{x1}(B_{x1})l_{x1}}{l_{\delta}(l_{y1} + l_{y2})}, \quad R_{mx2} = \frac{\nu_{x2}(B_{x2})l_{x2}}{l_{\delta}(l_{y1} + l_{y2})}, \quad (1)$$

где  $l_{\delta}$  – размер ячейки в третьем измерении;  $\nu_{x1}(B_{x1})$ ,  $\nu_{x2}(B_{x2})$ ,  $\nu_{y1}(B_{y1})$ ,  $\nu_{y2}(B_{y2})$  – удельные магнитные сопротивления, определяемые по соответствующим кривым намагничивания в зависимости от величины магнитной индукции на данном участке магнитной цепи (задача решается с учетом анизотропии свойств стали, а в трехмерной постановки задачи – с учетом шихтовки).

Магнитодвижущая сила обмоток распределяется равномерно по вертикальным участкам ячеек, располагающихся в области обмоток в виде источников ЭДС.

Так как схема замещения состоит из типовых элементов, то формирование электрической сетки может осуществляться автоматически с помощью программы параметрической генерации. Данная программа использует результаты проектного расчета трансформатора, реализуемого САПР распределительных трансформаторов (РТ), функционирующей в среде MSExcel. Параметрический генератор сеточной модели представляет собой программный код VBA. Результатом работы сеточного генератора является матрица соединений электрической цепи и массив параметров ячеек. Расчет нелинейной электрической цепи методом Ньютона осуществляется в цикле, на каждом шаге которого осуществляются следующие операции:

1) для текущих значений составляющих магнитной индукции (на первой итерации эти значения принимаются равными нулю) по кривым намагничивания определяются соответствующие удельные магнитные сопротивления;

2) рассчитываются магнитные сопротивления элементов ячеек;

3) параметры электрической цепи передаются в MatLab, где вызывается библиотека моделирования электрических цепей и рассчитываются токи во всех ветвях электрической схемы замещения, численно равные магнитным потокам на соответствующих участках магнитной цепи; результаты расчета возвращаются в вызывающую подсистему САПР РТ;

4) магнитная индукция на всех участках магнитной цепи рассчитывается по формулам

$$\begin{aligned}
 B_{x1} &= \frac{\Phi_{x1}}{(l_{y1} + l_{y2})l_{\delta}}, & B_{x2} &= \frac{\Phi_{x2}}{(l_{y1} + l_{y2})l_{\delta}}, \\
 B_{y1} &= \frac{\Phi_{y1}}{(l_{x1} + l_{x2})l_{\delta}}, & B_{y2} &= \frac{\Phi_{y2}}{(l_{x1} + l_{x2})l_{\delta}},
 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Phi_{xi}$ ,  $\Phi_{yi}$  – величина магнитного потока в  $i$ -м магнитном сопротивлении.

5) по полученным значениям составляющих магнитной индукции определяются соответствующие удельные магнитные сопротивления, и процесс итераций повторяется до достижения требуемой точности расчета.

Рассмотренный метод расчета основан на использовании библиотеки моделирования электрических цепей [3] и не требует специальных программных средств для расчета магнитного поля методом конечных элементов или конечных разностей. Следует отметить, что метод легко адаптируется для трехмерной постановки задачи. Время расчета зависит от требуемой точности и, как правило, составляет доли секунды.

### Литература

1. **Говорков В.А.** Электрические и магнитные поля, изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 448 с.
2. **Тихонов А.И., Лихачева А.В., Рубцов Д.В.** Моделирование электромеханических устройств в среде Simulink: метод. указ. к лаб. практикуму по теории подобия и моделирования; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 48 с.
3. **Тихонов А.И., Корнев И.А.** Библиотека для формирования и исследования моделей электрических цепей в динамических режимах / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2013610691. Заявка № 2012660143, приоритет от 22.11.2012, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2013.

УДК 628.543:537.84

Ю.И. СТРАДОМСКИЙ<sup>1</sup>, к.т.н., профессор;  
И.М. АРЕФЬЕВ<sup>2</sup>, к.х.н., доцент;  
С.Е. РАССОЛОВ<sup>2</sup>, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: [stradomskiy.urij@mail.ru](mailto:stradomskiy.urij@mail.ru)<sup>1</sup>, [elmash@ispu.ru](mailto:elmash@ispu.ru)<sup>2</sup>

### **Исследование возможности создания коалесцентного фильтра объемной очистки воды от нефтепродуктов с использованием магнитной жидкости**

**Аннотация.** Явление коалесценции капель нефтепродуктов с магнитной жидкостью, происходящее при их соприкосновении, может быть использовано для создания фильтров очистки воды от нефтепродуктов, способных к регенерации, и с высоким коэффициентом собираемости.

**Ключевые слова:** вода, нефтепродукты, очистка, магнитная жидкость.

YU.I. STRADOMSKIY, candidate of technical sciences, associate professor,  
I.M. AREFYEV, candidate of chemistry, associate professor,  
S.E. RASSOLOV, undergraduate  
Ivanovo State Power University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str., 34  
E-mail: [stradomskiy.urij@mail.ru](mailto:stradomskiy.urij@mail.ru)<sup>1</sup>, [elmash@ispu.ru](mailto:elmash@ispu.ru)<sup>2</sup>

### **Research of a possibility of creation of the coalescence filter for water purification from oil products with use of magnetic liquid**

**Abstract.** The phenomenon of a coalescence of drops of oil products with magnetic liquid occurring at their contact can be used for creation of filters for water purification from oil products. Such filters are capable to regeneration and possess high coefficient of a collecting.

**Key words:** water, oil products, purification, magnetic liquid.

2017 год в России объявлен годом экологии. Важной экологической проблемой является очистка воды от нефти и нефтепродуктов (НП) в связи с их широким применением во всех областях деятельности человека. Существенную стоимость в классической схеме очистки воды от НП представляет загрузка механических и, особенно, угольных сорбционных фильтров. Загрузка после загрязнения ее НП не подлежит восстановлению и должна быть утилизирована. Продлению ее срока службы может способствовать применение коалесцентного фильтра объемной очистки воды от нефтепродуктов с использованием магнитной жидкости (МЖ).

Для решения этой задачи следует использовать МЖ, в которой в качестве дисперсионной среды используется один из видов НП, например, керосине. Коалесценция – это укрупнение мелких капель при их слипании. Она протекает в три стадии. Первая стадия является определяющей – сближение двух капель друг с другом. Вторая стадия – образование «перешейка» возле точки касания, что приводит к увеличению общей поверхности и энергии капель. Третья стадия – перетекание жидкости из одной капли в другую. Оно происходит благодаря разности капиллярных давлений и зависит от радиусов капель. Капля с меньшим радиусом перетекает в каплю с большим радиусом, в связи с большим капиллярным давлением. По мере протекания разность капиллярных давлений увеличивается, поэтому перетекание идет с нарастающей скоростью и слипание капель происходит очень быстро.

Для проверки процесса коалесценции капель НП с МЖ в водной среде был проведен эксперимент (рис. 1,а). На стенке пластмассового сосуда, заполненного водой, с помощью постоянного магнита удерживался небольшой объем МЖ на основе керосина. С помощью изогнутой иглы шприца под МЖ вводилась капля НП (нефть), которая, проскакивая мимо поверхности МЖ, устремлялась к внешней поверхности воды. Опыт показал, что действующая на каплю НП результирующая подъемная сила  $F = F_A - F_T = (\rho_B - \rho_{НП}) \cdot g \cdot V$  существенно превышает силу взаимодействия капли НП с МЖ. Этого следовало ожидать, поскольку нефть и ее продукты нерастворимы в воде, являясь гидрофобными материалами, и тонкая пленка воды между поверхностями МЖ и капли НП является серьезным препятствием для их слипания.

Для реализации процесса коалесценции необходимо создать условия для соприкосновения капель НП с поверхностью МЖ. С этой целью был проведен эксперимент (рис. 1,б), в котором объем МЖ удерживался постоянным магнитом на внешней поверхности воды, а капля НП прижималась к поверхности МЖ подъемной силой  $F$ . При этих условиях опыта процесс коалесценции четко наблюдался.

Был испытан макет коалесцентного фильтра, корпус которого представляет собой полый прямоугольный параллелепипед, состоящий из

параллельных боковых (170 мм x 170 мм) и торцевых стенок (170 мм x 50 мм), и дна. Крышка отсутствует. В торцевые стенки впрессованы патрубки. Все элементы корпуса и патрубки выполнены из немагнитных материалов. Внутренняя полость фильтра заполнена ферромагнитной стружкой, на поверхности которой тонким слоем распределена магнитная жидкость.

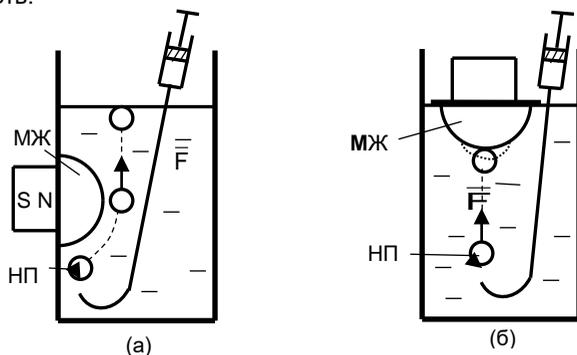


Рис. 1. Исследование коалесценции капли НП с МЖ при расположении МЖ на стенке сосуда – (а) и на внешней поверхности воды – (б)

В макете загрязненная вода (ЗВ) подается через входной патрубок, проходит через стружку с магнитной жидкостью. НП коалесцирует с МЖ и остается внутри фильтра. Очищенная вода (ОВ) выводится через выходной патрубок.

В макете загрязненная вода (ЗВ) подается через входной патрубок, проходит через стружку с магнитной жидкостью. НП коалесцирует с МЖ и остается внутри фильтра. Очищенная вода (ОВ) выводится через выходной патрубок.

Эксперимент проводился в следующей последовательности. Пустой макет помещался между полюсами электромагнита. При значениях тока в обмотке электромагнита  $I = 0\text{ А}$ ,  $2\text{ А}$  и  $4\text{ А}$  измерялась магнитная индукция в средней точке контейнера, которая составляла соответственно  $B=0\text{ Тл}$ ,  $0,145\text{ Тл}$  и  $0,291\text{ Тл}$ . Далее засыпалась стружка, и с помощью магнитного поля она уплотнялась во внутреннем объеме макета. Стружка использовалась мелкая и крупная. Масса стружки сохранялась одинаковой. Мелкая стружка имела меньший объем и больший коэффициент его заполнения ( $K_{\text{мелк.}}=0,168$  и  $K_{\text{круп.}}=0,0975$ ). Поверхность стружки равномерно смачивалась МЖ объемом 20 мл. Устанавливался ток в обмотке электромагнита равным  $I = 0\text{ А}$ , или  $2\text{ А}$ , или  $4\text{ А}$ . Готовилась для пролива через фильтр очередная порция ЗВ, состоящая из 1 л воды и 40 мл НП. Пролив одной порции ЗВ осуществлялся в течение примерно пяти минут. Для одной загрузки фильтра МЖ проводились

проливы нескольких порций ЗВ для определения количества НП, которое может собрать фильтр.

Оценка качества очистки воды проводилась в основном путем визуального сравнения образцов ОВ. Для наилучшего образца ОВ в Ярославском государственном техническом университете на кафедре охраны труда и природы с использованием современного оборудования была измерена концентрация НП в ОВ, которая составила 1,4 мг/л. Таким образом, коэффициент собираемости фильтром НП при первом проливе составил 0,96, что является хорошим показателем. Влияние исследуемых факторов на качество работы фильтра распределилось следующим образом: качество очистки воды снижается при увеличении расхода ЗВ через фильтр, при отсутствии магнитного поля, при низком заполнении объема фильтра стружкой; увеличение магнитной индукции свыше 0,2Тл на качество очистки не влияет.

УДК 621.928.12:537.84

Ю.И. СТРАДОМСКИЙ<sup>1</sup>, к.т.н., профессор;  
В.А. ФИЛИПPOВ<sup>2</sup>, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: stradomskiy.urij@mail.ru<sup>1</sup>, 9basy9@gmail.com<sup>2</sup>*

### **Проектный расчет магнитожидкостного сепаратора дисперсных немагнитных материалов**

**Аннотация.** Разработана методика выбора размеров магнитожидкостного сепаратора с учетом размеров частиц тяжелой и легкой фракций, требований к точности и производительности их разделения.

**Ключевые слова:** сепарация, немагнитные частицы, магнитная жидкость.

Yu.I. STRADOMSKY, candidate of technical sciences, associate professor,  
V.A. FILIPPOV, master of Engineering, senior lecturer

Ivanovo State Power Engineering University,  
153003 Ivanovo, 34 Rabfacovskay str., Russian Federation,  
*E-mail: stradomskiy.urij@mail.ru<sup>1</sup>, 9basy9@gmail.com<sup>2</sup>*

### **Design calculation of a magnetic fluid separator for disperse nonmagnetic materials**

**Abstract.** A method for determining the required dimensions of a magnetic-fluid separator has been developed, considering the particle sizes of the heavy and light fractions, the requirements for the accuracy and efficiency of their separation.

**Key words:** separation, non-magnetic particles, magnetic fluid.

Исходными данными для проектирования магнитожидкостного сепаратора (МЖС) являются: 1) плотности частиц легкой  $\rho_{\text{ЧЛ}}$  и тяжелой  $\rho_{\text{ЧТ}}$  фракций; 2) максимальный диаметр частиц  $d_{\text{Ч max}}$ ; 3) производительность МЖС для легкой QL и тяжелой QT фракций; 4) начальная скорость движения частиц после подающего устройства на поверхности магнитной жидкости (МЖ)  $\vec{v}_0 = v_{0y}\vec{e}_y + v_{0z}\vec{e}_z$ .

Проектный расчет МЖС включает в себя следующие этапы.

**1. Выбор МЖ.** Для сепарации обычно используют МЖ на керосине с намагниченностью насыщения  $MS=10\div 40$  кА/м, как наиболее дешевую и маловязкую. Понижение вязкости МЖ способствует повышению производительности сепарации. Недостатки МЖ на керосине: токсичность, пожароопасность, хорошая испаряемость. Лучше использовать МЖ на воде, но она дороже. Для выбранной МЖ известны: зависимость ее намагниченности от напряженности магнитного поля  $M(H)$ , значения намагниченности насыщения  $MS$  и плотности  $\rho_{\text{Ж}}$ .

**2. Выбор геометрии рабочего зазора МЖС.** Минимальная ширина рабочего зазора (рис. 1) должна превышать максимальный диаметр частиц:  $2x_{\text{П0}} > d_{\text{Ч max}}$ . Геометрия профиля полюсного наконечника рассчитывается по формуле:

$$\frac{x_{\text{П}}}{x_{\text{П0}}} = \frac{1}{1 - A(y_{\text{П}} - y_0)}, \quad A = \frac{g \cdot (\rho^* - \rho_{\text{ж}})}{M_{\text{S}} \cdot B_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где:  $\rho^* = 0,5(\rho_{\text{ЧЛ}} + \rho_{\text{ЧТ}})$  – среднее значение плотности сепарируемых частиц;  $B_{\text{max}} = \mu_0 U_{\text{П}} / x_{\text{П0}}$  – максимальное значение индукции в рабочем зазоре МЖС;  $U_{\text{П}}$  – значение скалярного магнитного потенциала на поверхности полюсного наконечника;  $g$  – ускорение свободного падения.

Величины, входящие в коэффициент  $A$ , изменяются в предсказуемых пределах:  $(\rho^* - \rho_{\text{ж}}) = 4000\div 12000$  кг/м<sup>3</sup> – при разделении металлов от алюминия до свинца;  $MS=10\div 40$  кА/м;  $B_{\text{max}}=0,4\div 1$  Тл. С учетом этого коэффициент  $A$  принимает значения в интервале  $A=2,5\div 25$  м<sup>-1</sup>, для которого форма поверхности полюсного наконечника представлена на рис. 2. От  $A$  и  $x_{\text{П0}}$  зависит высота зоны сепарации рабочего зазора  $h_{\text{С}}$ , в пределах которой результирующая сила  $F_{\text{ВЫТ}} = F_{\text{М}} + F_{\text{А}} - F_{\text{Т}}$ , выталкивающая немагнитную частицу из МЖ, постоянна. Для зависимостей на рис. 3  $F_{\text{ВЫТ}} \approx \text{const}$  в пределах 5%. Увеличение  $h_{\text{С}}$  способствует повышению точности сепарации. Согласно рис. 3 это возможно при уменьшении  $A$ , то есть при увеличении  $(MS \cdot B_{\text{max}})$ . Рост  $MS$  достигается за счет увеличения объемной концентрации магнитной фазы МЖ, что приведет к увеличению вязкости МЖ и, как следствие, к снижению производительности МЖС. Рост  $B_{\text{max}}$  возможен при увеличении МДС обмотки возбуждения, что приведет к росту стоимости МЖС и потреб-



**5. Производительность МЖС по лёгкой фракции.** Определяется на основании анализа движения в МЖ легких частиц в плоскости zOy [2]. Рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{л}} = b_{\text{ж}} \cdot d_{\text{чл}} \cdot k_3 \cdot V_{\text{уст.л}}, \quad (4)$$

где:  $b_{\text{ж}}$  – ширина верхней свободной поверхности МЖ в плоскости xOy в зоне выхода легкой фракции;  $k_3$  – коэффициент заполнения дуги  $b_{\text{ж}}$  частицами;  $V_{\text{уст.л}}$  – установившаяся скорость движения легких частиц на поверхности МЖ.

#### Литература

1. **Страдомский Ю.И.**, Казаков Ю.Б., Филиппов В.А. Анализ движения сепарируемых частиц в зазоре сепаратора на основе нанодисперсных магнитных жидкостей. // Всероссийская научная конференция «Физико-химические проблемы магнитных дисперсных наносистем». Ставрополь, 2009 г. Сборник научных трудов, с. 246 – 252.
2. **Казаков Ю.Б.**, Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. Математическая модель движения немагнитных частиц в рабочем зазоре гидростатического магнито-жидкостного сепаратора. // Сборник научн. трудов 17-ой Междун. Плесской научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. – Плес. Сентябрь 2016. Сборник научных трудов, с.178-186.

УДК 621.321

Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н. профессор; Н.А. МОРОЗОВ, доцент;  
С.А. НЕСТЕРОВ, к.т.н. аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: elmash@em.ispu.ru

### Совершенствование конструкции магнитожидкостного демпфера

**Аннотация.** Предлагаются пути совершенствования конструкций магнито-жидкостных демпферов на основе анализа полей и особенностей поведения магнитных жидкостей в магнитных полях.

**Ключевые слова:** магнитожидкостный демпфер, магнитная жидкость.

Yu.B.KAZAKOV, prof.; N.A.MOROZOV, assistant prof.;  
S.A.NESTEROV post-graduate student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, ul. Rabfakovskaya 34  
E-mail: elmash@em.ispu.ru

### Improving the construction of magnetorheological fluid damper

**Abstract.** The ways of improving the design of magnetorheological fluid damper based on the analysis of fields and behavior of magnetorheological fluid in magnetic fields are proposed.

**Key words:** magnetorheological fluid damper, magnetorheological fluid.

Совершенствование конструкции магнитожидкостных демпферов (МЖД) является важной задачей при повышении эффективности демпфирования колебаний. В качестве направлений, увеличивающих эффективность МЖД, рабочим телом в которых используют магнитную жидкость (МЖ), можно отметить следующие:

- увеличение максимальной напряжённости магнитного поля в областях основной диссипации энергии в движущейся МЖ;
- увеличение протяжённости дроссельных каналов, в которых происходит вязкостная диссипация и рассеивание энергии колебаний;
- уменьшение магнитного потока рассеяния, замыкающегося по конструктивным элементам и/или по воздуху и не воздействующего на МЖ;
- уменьшение магнитного потока, воздействующего на МЖ в областях, в которых нет значительной диссипации энергии колебаний;
- уменьшение фрикционного взаимодействия между поршнем и корпусом с использованием эффекта центрирования немагнитных тел в МЖ в области градиентного магнитного поля;
- снижение возникающих в МЖ максимальных перегревов, которые ухудшают магнитные и вязкостные свойства МЖ и негативно сказываются на стабильности работы устройства.

Самым распространённым конструктивным решением МЖД является увеличение длины дроссельных каналов и магнитного потока в них. Каналы соединяют рабочий объём с высоким давлением и буферный объём, куда перетекает МЖ. Это резко увеличивает объём демпферного устройства, требует дополнительного узла, создающего магнитное поле, выполнения области перетекания МЖ и элементов рассеяния тепловой энергии. Последний аргумент не является определяющим.

Исследования напорного течения МЖ в щелевых каналах с поперечным магнитным полем показали, что потери напора в этом случае достаточно велики, чтобы использовать области щелевого течения МЖ между движущимся поршнем и корпусом демпфера для создания заметных противодействующих движению поршня усилий. Потери напора при щелевом течении МЖ в поперечном магнитном поле достаточно для создания требуемой от демпфера силовой характеристики, что было невозможно при течениях обычных жидких сред.

Правильная проработка конструкции поршня с электромагнитной системой позволит не только получить нужные силовые характеристики, но и заметно снизить объём демпфера, исключив внешние дроссельные устройства. Следовательно, основные усилия можно направить на совершенствование поршневого узла, который создаёт односторонне давление в рабочей МЖ и магнитное поле в щелевых каналах между поршнем и корпусом или внутри поршня. Конструкцией поршня определяется вид каналов, их длина, форма, размеры поперечного сечения и интенсивность действующего магнитного поля.

Положительным свойством в этом случае является и то обстоятельство, что протекающая в щелевых или другого вида каналах с магнит-

ным полем рабочая МЖ уносит с собой тепловую энергию вязкостной диссипации в большие объёмы МЖ над и под поршнем в зависимости от направления хода поршня. В этих объёмах нагретая МЖ перемешивается с большим количеством жидкости и интенсивно охлаждается. Не возникают локальные перегревы жидкости, что благотворно влияет на свойства рабочей МЖ и на стабильность характеристик МЖД. По результатам исследований предложено несколько конструкций управляемого МЖД, которые защищены патентами Российской Федерации.

Неактивный поршень, который движется в магнитном поле, создаваемом электромагнитной системой на корпусе, составлен из чередующихся магнитопроводящих и немагнитных пластин [1]. Набор пластин выполнен вдоль пути магнитного потока, что обеспечивает большую магнитную проводимость поршня. Дросселирующие каналы вдоль оси поршня образованы элементами магнитопроводящих пластин, что позволяет выполнять большое число параллельных дроссельных каналов. В зависимости от вязкости МЖ и магнитореологической суспензии, которая часто используется как рабочее тело МЖД, можно в малом объёме поршня выполнять количество каналов, обеспечивающее нужную силовую характеристику.

Неактивный поршень сам не создаёт магнитное поле, которое возбуждается внешней электромагнитной системой. И хотя магнитопровод электромагнитной системы служит корпусом демпфера и защитой от внешнего механического воздействия, но габариты амортизатора с неактивным поршнем очень растут. Более компактны амортизаторы на основе МЖД с активным поршнем, который служит источником магнитного потока. Конечно, катушка намагничивания располагается внутри поршня, что ограничивает её поверхность охлаждения и предполагает сильный нагрев поршня и МЖ. Этот недостаток можно устранить включением катушки управления только на время гашения колебаний, что и соответствует наиболее частому повторно-кратковременному режиму работы МЖД.

Наиболее просто изготовить поршень с одной катушкой управления требуемой длины и П-образной магнитной системой. Если корпус МЖД выполнить из ферромагнитного материала, то возникают большие силы одностороннего тяжения тем большие, чем больше эксцентриситет зазора между поршнем и корпусом системы. Если корпус МЖД выполнить из немагнитного материала, то одностороннего тяжения не будет, а поршень самоцентрируется в цилиндрическом корпусе из-за наличия градиентных магнитных полей в зазоре системы. Однако, область магнитного дросселирования МЖ при движении поршня мала и определяется только размером полюса по оси поршня.

Увеличить эффективность такого активного поршня можно созданием осевых дроссельных каналов, используя полюсы не в виде дисков, а в виде дисков с пальцевыми наконечниками вдоль оси поршня [2]. Такие полюсы можно изготовить фрезерованием цилиндров с дном с

одного торца. Выполняются два таких полюса, вставляемых друг в друга своими пальцами в пазы другого полюса. Азимутальный размер пазов несколько больше размера пальцев. В результате между пальцами образуются зазоры, в которых и протекает МЖ. Магнитное поле переходит с пальцев одного полюса на пальцы другого полюса, создаётся поперечное магнитное поле в зазорах, в которых протекает МЖ. Регулировка магнитного поля осуществляется изменением тока намагничивания в катушке управления, которая расположена внутри цилиндра, образованного пальцами полюсов. По центру катушки проходит ферромагнитный сердечник, переходящий в шток поршня.

Возможно также создание активного поршня с чередующимися по его оси полюсами, то есть расположение по оси поршня нескольких кольцевых катушек, разделённых дисковыми полюсами. Все возможности такого активного поршня ещё не исследованы.

#### Литература

1. Патент 2550793 РФ, МПК F16 F9/53, F16 F6/00. Управляемый магнитожидкостный амортизатор / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. – 5 с.
2. Патент 2506476 РФ МПК F16 F9/53 F16 F6/00. Поршневой магнитожидкостный амортизатор / Н.А. Морозов, С.А. Нестеров; опубл. 10.02.14, Бюл. № 4.

УДК 621.313

Д.Ю. МАКАРОВ, магистрант;  
Н.А. МОРОЗОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: [elmash@em.ispu.ru](mailto:elmash@em.ispu.ru)

### Учет ферромагнитного наполнения в расчете магнитных цепей

**Аннотация.** Проведён анализ и экспериментальное исследование влияния ферромагнитного наполнителя на магнитную проводимость рабочего зазора.

**Ключевые слова:** магнитная проводимость, ферромагнитный наполнитель, рабочий зазор.

D.Yu. MAKAROV, undergraduate,  
N.A. MOROZOV, Candidate of Engineering

Ivanovo State Power University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34  
E-mail: [elmash@em.ispu.ru](mailto:elmash@em.ispu.ru)

### The account of a ferromagnetic filler in the calculation of magnetic circuits

**Abstract.** Analysis and experimental study of the influence of the ferromagnetic filler in the magnetic conductivity of the working gap, were conducted.

**Keywords:** magnetic conductivity, ferromagnetic filler, working gap.

В ряде технических устройств, например в фильтровальных установках различного назначения, применяют ферромагнитный наполнитель (ФМН), удерживаемый магнитным полем или проводящий магнитный поток. При расчёте магнитных систем таких установок необходимо учитывать магнитные свойства наполнителя. ФМН представляет собой малоразмерные элементы из ферромагнитного материала. Это могут быть отходы фрезерования пазов в стальных деталях. Они представляют собой пластинчатые изогнутые элементы близкой к прямоугольной форме и создают мелкоячеистую структуру,

Проблемой является расчёт магнитной цепи, в которой есть участок с неизвестными нелинейными магнитными свойствами, заполненный ФМН рабочий объём. Неизвестными являются плотность заполнения рабочего объёма, характер расположения пластинок наполнителя и его магнитные свойства. Дальнейшие исследования показали, что и физические свойства стружки отличны от известных для её материала, в частности меняется плотность. Так как стружка имеет неправильную форму и хаотичное расположение в рабочей зоне, то аналитически решить эту задачу невозможно.

Проведённое компьютерное моделирование рабочего зазора с ФМН даёт только общее представление о его влиянии на магнитную проводимость зазора, который он заполняет [1]. Реальный ферромагнитный наполнитель, отходы от фрезерования шпоночных пазов на валах из стали 45, имеет средние размеры отсеянной фракции  $a \times b \times c = 5 \times 8 \times 0,3$  мм. Численный эксперимент выявил независимость от положения чешуек коэффициента объёмного заполнения рабочей зоны ячейки. Основное влияние на заполнение оказывают размеры чешуек и зазоры между ними

Методом вытеснения воды и взвешивания определена плотность стружечного наполнителя из стали 45, которая оказалась равной 5090 кг/м<sup>3</sup> при плотности исходного материала 7826 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент пористости ФМН, определённый отношением объёма наполнителя к занимаемому им объёму составил 0,2.

Был проведён натурный эксперимент по определению магнитных свойств ФМН. Магнитное поле создавалось установкой ФЛ-1. Ячейка, имитировавшая рабочий зазор, имела стальные пластины размером 100x100 мм с зазором между ними 30 мм. В зазор порциями помещался ФМН и измерялся магнитный поток в ячейке и напряжённость магнитного поля. Результаты опыта показывают, что влияние ФМН на магнитный поток в рабочем зазоре практически пропорционально его количеству.

При малых токах намагничивания до 1 А магнитный поток увеличивается резко. По мере роста тока от 1 до 3,6 А влияние наполнителя на проводимость рабочего зазора постепенно уменьшается и при токах в катушках намагничивания от 3,6 до 5 А, когда ФМН насыщается, проводимость рабочего зазора приближается к проводимости воздуха, рост не более 15 %. Однако влияние ферромагнитного наполнителя на магнит-

ную проводимость рабочего зазора остается пропорциональным его количеству.

Найденные по результатам опыта магнитные свойства ФМН оказались явно заниженными. Относительная магнитная проницаемость при малых напряженностях магнитного поля не превышала 2,0 и быстро снижалась до 1,1–1,3. Это свидетельствует о малом заполнении рабочего объема наполнителем и быстрым его насыщением, что можно объяснить постепенным заполнением рабочего зазора ячейки.

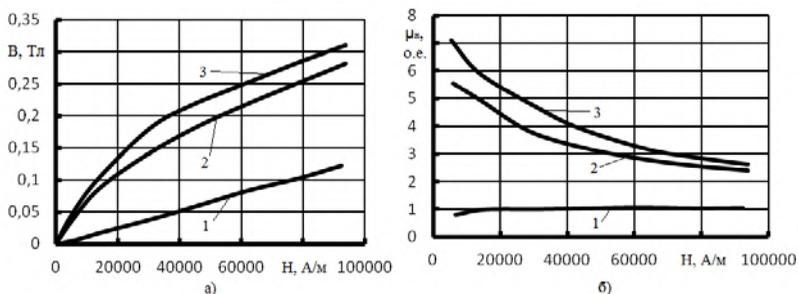


Рис. 1. Зависимость магнитной индукции  $B$  (а) и относительной магнитной проницаемости  $\mu_n$  (б) от напряженности магнитного поля: 1 – воздушный промежуток; 2 – отожженный ФМН; 3 – неотожженный ФМН

Известно, что при резании металла возникают сильные механические напряжения, ухудшающие магнитные свойства. В целях улучшения магнитных свойств ФМН был проведен отжиг части наполнителя; нагрев до 830 °С, выдержка 30 минут и охлаждение вместе с печью. Затем на установке ФЛ-1 снимались характеристики намагничивания ФМН с отжигом и без него. По результатам опыта построены кривые намагничивания ФМН и относительной магнитной проницаемости (рис. 1).

Для снятия кривых была использована немагнитная ячейка с размерами под ФМН 60,5x54x92 мм. Полное заполнение пространства обеспечивалось вибрацией ячейки. Элементы наполнителя располагались в плоскости прохождения магнитного потока.

Достаточный объем ячейки позволил получить магнитные характеристики ФМН, более реалистичные, чем в проводимом ранее эксперименте. Для сравнения и контроля результатов приведены кривые 1 для ячейки без ФМН: линейная кривая намагничивания (рис. 1,а) и относительная магнитная проницаемость равна единице (рис. 1,б). Из кривых видно, что кривые намагничивания ФМН не линейны и быстро переходят в насыщение. Уже при средней магнитной индукции 0,2 Тл в наполнителе его относительную магнитную проницаемость  $\mu_n$  можно считать практически постоянной. Относительная магнитная проницаемость  $\mu_n$

изменяется в диапазоне от 7 до 2, что требует учёта ФМН в расчёте магнитной цепи.

Магнитные свойства отожжённого ФМН несколько снизились, что можно объяснить большой поверхностью стружечного ФМН и образованием оксидных плёнок, имеющих магнитные свойства хуже, чем у стали.

**Выводы.** При использовании стружечного ФМН следует учитывать заметное ухудшение его магнитных свойств, что объясняется механической деформацией материала при обработке деталей. Улучшения свойств нельзя достичь отжигом наполнителя перед его использованием. Следует выбирать ФМН на основе материала типа Ст3 с лучшими магнитными свойствами, чем у сталей повышенной прочности.

#### Литература

1. **Морозов Н.А.** Влияние ферромагнитного наполнителя на проводимость воздушного зазора / Н.А. Морозов, Д.Ю. Макаров. // 17-я международная Плеская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Сб. научн. трудов. (Плёт, 6–9 сентября 2014 года). ИГЭУ им. В.И. Ленина. – Иваново, 2016. – С. 272–279.

СЕКЦИЯ 11.  
«ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА  
МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

УДК 51-76: 519.63

Л.Б. МАСЛОВ, д.ф.-м.н., доцент,  
Н.Г. ТОМИН, к.ф.-м.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: maslov@tipm.ispu.ru1, nikolay.tomin@gmail.com2*

**Алгоритм вычисления концентраций клеток методом Роте  
в случае условий Дирихле на граничных сечениях кости**

**Аннотация.** Построен алгоритм приближенного аналитического решения методом Роте смешанной граничной задачи для системы квазилинейных дифференциальных уравнений типа «реакция-диффузия» в рамках построенной ранее математической модели, описывающей динамику концентраций костных клеток.

**Ключевые слова:** алгоритм, преобразование клеток, метод Роте, уравнения типа «реакция-диффузия».

L.B. MASLOV Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor  
N.G. TOMIN, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: maslov@tipm.ispu.ru1, nikolay.tomin@gmail.com2*

**An algorithm for the calculation of cell concentrations by Rothe  
method under Dirichlet conditions on the boundary sections  
of bone**

**Abstract.** An algorithm of the approximate analytical solution by Rothe method for a mixed boundary value problem for systems of quasilinear PDE such as reaction-diffusion equations is constructed in the previously proposed mathematical model describing bone cells concentration dynamics.

**Key words:** algorithm, cell transformation, Rothe method, reaction-diffusion equations.

Восстановление физико-механических свойств костной ткани после перелома или в области имплантата обусловлено законами преобразования клеток и действием внешней механической нагрузки. Для создания адекватной математической модели регенерации кости необходимо формализовать клеточные процессы миграции, пролиферации и дифференциации основных фенотипов клеток: мезенхимальных стволовых

(МСК), фибробластов, хондроцитов и остеобластов, а также временно-го и пространственного распределения фиброзной, хрящевой и костной тканей, создаваемых соответствующими клетками.

Деятельность указанных четырех типов клеток, взаимодействующих в зависимости от механической стимуляции, и возникающих видов тканей, включая дополнительно сеть кровеносных сосудов, характеризуется преобразованием друг в друга и в тканевые структуры и описывается системой уравнений типа «реакция-диффузия» [1]. Пусть  $m \geq 1$ ,  $l > 0$ . Тогда рассматривается следующая смешанная граничная задача для системы  $m$  дифференциальных уравнений в частных производных второго и/или первого порядка относительно  $m$  неизвестных функций  $u_1(x, t), u_2(x, t), \dots, u_m(x, t)$  в плоскости  $Oxt$  на полуполосе  $\square = \{(x, t) : 0 \leq x \leq l, t \geq 0\}$  [1]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + P_i(u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (i = \overline{1, m}, \quad 0 < x < l, \quad t > 0), \quad (1)$$

$$u_i(0, t) = u_{i1}, \quad u_i(l, t) = u_{i1} \quad (i = \overline{1, m}, \quad D_i > 0, \quad t > 0), \quad (2)$$

$$u_i(x, 0) = u_{i0}(x) \quad (i = \overline{1, m}, \quad 0 \leq x \leq l). \quad (3)$$

В соотношении (1) коэффициенты диффузии неотрицательны:  $D_i \geq 0$  ( $i = \overline{1, m}$ ). Будем считать, что первые  $s$  уравнений системы (1) описывают движение и преобразования указанных  $s$  видов клеток, для которых  $D_i > 0$ , а остальные  $m - s$  уравнений описывают преобразования тканей без диффузии ( $D_i = 0$ ).

Многочлены второго порядка от  $m$  переменных  $u_1, u_2, \dots, u_m$ , входящие в правую часть (1), имеют вид [1]:

$$P_i(u_1, u_2, \dots, u_m) = a_i^{pr} u_i (1 - u_i / \tilde{u}_i) + \sum_{j \neq i} [a_{ji}^{diff} u_j (1 - u_i / \tilde{u}_i) - a_{ij}^{diff} u_i (1 - u_j / \tilde{u}_j)] - a_i^{ap} u_i \quad (i = \overline{1, m}) \quad (4)$$

Биофизический смысл входных параметров, участвующих в (1) – (4), раскрывается в статье [1], где речь идет о частном случае  $m = 8$ ,  $s = 4$ , в то время, как здесь рассматривается общий случай  $m \geq 1$ ,  $0 \leq s \leq m$ .

Для решений системы (1) – (3) при постоянных граничных условиях Дирихле (в случае  $D_i = 0$  полагаем  $u_{i1} = 0$ ) введем вспомогательные функции

$$w_i(x, t) = u_i(x, t) - u_{i1} \quad (i = \overline{1, m}). \quad (5)$$

Функции (5) образуют решение аналогичной смешанной задачи, но уже с однородными условиями Дирихле в граничных точках 0 и  $l$  отрезка  $[0, l]$ :

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} + P_i(w_1 + u_{i1}, \dots, w_m + u_{m1}) \quad (i = \overline{1, m}, 0 < x < l, t > 0), \quad (6)$$

$$w_i(0, t) = 0, \quad w_i(l, t) = 0, \quad (i = \overline{1, m}, D_i > 0, t > 0), \quad (7)$$

$$w_i(x, 0) = u_{i0}(x) - u_{i1} \quad (i = \overline{1, m}, 0 \leq x \leq l). \quad (8)$$

Для приближенного решения смешанной граничной задачи (6)–(8) используем метод Роте [2]. Следуя этому методу, производим дискретизацию только по временной переменной  $t$ , при этом пространственная переменная  $x$  остаётся непрерывной и пробегает отрезок  $[0, l]$  числовой оси. Пусть  $\tau > 0$  – временной шаг,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ,  $t_k = k\tau$ ,  $I_k = \{(x, t_k) : 0 \leq x \leq l\}$  –  $k$ -ый временной слой.

Применяя к смешанной граничной задаче (6) – (8) изложенную на стр. 288-290 книги [2] схему приближенного аналитического решения методом Роте и возвращаясь согласно (5) к неизвестным функциям  $u_i$ , получим расчётные формулы алгоритма (9)–(11). Приближенные вычисления концентраций производятся поочередно на 1-ом, 2-ом, ... ,  $n_t$ -ом временных слоях единообразно для всех  $m$  видов клеток и тканей по следующей **рекуррентной формуле**:

$$u_i(x, t_k) = u_{i1} + \sum_{j=1}^{n_f} \frac{c_{ijk}}{\tau D_i (\pi j / l)^2 + 1} \sin \frac{\pi j x}{l}, \quad (9)$$

где

$$c_{ijk} = \frac{2}{l} \int_0^l v_{ik}(x) \sin \frac{\pi j x}{l} dx, \quad (10)$$

$$v_{ik}(x) = u_i(x, t_{k-1}) - u_{i1} + \tau P_i(u_1(x, t_{k-1}), \dots, u_m(x, t_{k-1})). \quad (11)$$

На первом шаге  $k = 1$  при вычислении  $u_i(x, \tau)$  для подстановки  $u_1(x, 0), \dots, u_m(x, 0)$  в (11) используются начальные условия (3). Временной шаг  $\tau > 0$ , число удерживаемых слагаемых в ряде Фурье  $n_f$  и число рассматриваемых временных шагов  $n_t$  нужно выбирать таким образом, чтобы достигалась достаточная точность вычислений. С помощью кода, реализующего алгоритм (9) – (11) на языке *Wolfram Language (Mathematica)*, проведены тестовые вычисления и получены распределения концентрации клеток и тканей по времени и координате.

### Литература

1. Кирпичёв, И.В. Математическая модель клеточных преобразований при регенерации костной ткани в условиях изменяющейся биохимической среды с возможной механорегуляцией / И.В. Кирпичёв, Д.И. Коровин, Л.Б. Маслов, Н.Г. Томин // Российский журнал биомеханики, 2016. – Т.20, № 3. – С.220-235.
2. Мартинсон, Л.К. Дифференциальные уравнения математической физики / Л.К. Мартинсон, Ю.И. Малов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 368 с.

УДК 677.054.33

А.К. КОЛОТИЛОВ<sup>1</sup>, студент;  
Д.А. ПИРОГОВ<sup>1</sup>, к.т.н., ст. преподаватель,  
Р.В. ШЛЯПУГИН<sup>2</sup>, к.т.н., доцент; С.В. СЕЛЕЗНЕВ<sup>2</sup> ст. преподаватель

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

<sup>2</sup>Ивановский государственный политехнический университет  
153037 г. Иваново, ул. 8 Марта, 20  
*E-mail: pirogov81@mail.ru*

### Исследование упругих колебаний конструктивных элементов механизма привода челноков лентоткацкого станка

**Аннотация.** В работе рассматривается задача исследования крутильных колебаний механизма привода челноков лентоткацкого станка ТЛА-2/70-С. В результате разработана методика определения крутильных колебаний системы. Получены зависимости, которые позволяют определить углы закручивания характерных точек модели в режиме вынужденных колебаний.

**Ключевые слова:** динамическая модель, прикладная теория колебаний, крутильные колебания, механизм привода челноков.

A.K. KOLOTILOV<sup>1</sup> student; D.A. PIROGOV<sup>1</sup>, PhD(Eng.), senior lecturer;  
R.V. SHLYAPUGIN<sup>2</sup> PhD (Eng.), assistant professor;  
S.V. SELEZNEV<sup>2</sup>, senior lecturer.

<sup>1</sup>Ivanovo State Power Engineering University  
34, Rabfakovskayast., Ivanovo, 153003, Russian Federation

<sup>2</sup>Ivanovo State Polytechnic University  
20, 8 March, Ivanovo, 153037, Russian Federation  
*E-mail: pirogov81@mail.ru*

### The research of elastic vibrations of structural elements of the drive mechanism shuttles ribbon loom

**Abstract.** This paper examines the research problem of torsional vibrations of the drive mechanism shuttles ribbon loom TLA-2/70-C. As a result, we developed a technique for determining the torsional vibrations of the system. The dependencies

that allow us to determine the angles of twist of characteristic points of the model in the forced oscillation mode.

**Keywords:** dynamic model, applied theory of vibrations, torsional vibrations, the drive mechanism of the shuttles.

В любой конструкции, содержащей податливые элементы, например, зубчатый ремень, валы, при возвратно-вращательном законе движения со скоростями, достигающими 400...450 об/мин возможно возникновение колебательных явлений и упругих деформаций, которые способны вызвать нарушение требуемых технологических параметров работы технической системы. Поэтому необходима оценка упругих деформаций элементов в режиме вынужденных колебаний.

Для решения поставленной задачи в [1] разработана динамическая модель механизма и решена задача о собственных колебаниях, примем ее за основу данного исследования. Вынужденные колебания системы обусловлены силовым возмущением – по заданному закону движения, определяемому параметрами сервопривода. Поэтому необходимо дополнить динамическую модель механизма (рис.1) крутящим моментом  $M(t)$ .

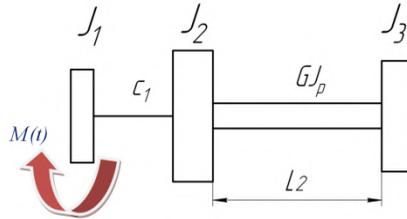


Рис. Динамическая модель механизма

На рисунке приняты следующие обозначения:  $J_1$  – суммарный момент инерции массы ротора серводвигателя и шкива, закрепленного на нем;  $J_2$  – приведенный момент инерции массы шкивов зубчатременной передачи и натяжного ролика;  $J_3$  – приведенный к валу 4 момент инерции массы зубчатых колес 5 и челноков 6;  $c_1$  – коэффициент жесткости зубчатого ремня;  $GJ_p$  – приведенный коэффициент жесткости валов.

Уравнение движения системы имеет вид:

$$\begin{cases} J_1 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + c_1 (\varphi_1 - \varphi_{2(x_2=0)}) = M(t); \\ -J_2 \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} \Big|_{(x_2=0)} + c_1 (\varphi_{2(x_2=0)} - \varphi_1) + GJ_p \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_{2(x_2=0)}} = 0; \\ J_3 \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} \Big|_{(x_2=L_2)} - GJ_p \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_{2(x_2=L_2)}} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Используемые на практике законы движения серво привода позволяют представить функцию  $M(t)$  в виде ряда Фурье. Представление крутящего момента в виде  $M(t) = M_0 + \sum M_i \sin \omega_i t$ , позволяет получить решение системы (1) в замкнутой форме.

Решение уравнений системы (1) будем искать в виде возмущающей функции:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= A_{i1} \sin \omega_i t \\ \varphi_2(x, t) &= \sum_i X_i(x) \sin \omega_i t\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\varphi_1$  - угол поворота диска  $J_1$ ,  $\varphi_2$  - угол закручивания произвольного сечения эквивалентного вала;  $\omega_i$  - частота вынужденных колебаний,  $A_1$  – амплитуда колебаний диска  $J_1$ ;  $X_i(x)$  – функция формы крутильных колебаний вала,  $G$  – модуль сдвига материала вала;  $J_\rho$  – полярный момент инерции поперечного сечения эквивалентного вала.

При нахождении искоемых величин принимаем, что собственные колебания системы быстро затухают и в общем решении не учитываются.

В итоге получим

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= A_{11} \sin \omega_1 t + A_{12} \sin \omega_2 t \\ \varphi_2(x, t) &= \left[ C_1 \sin\left(\omega_1 \frac{x}{a_1}\right) + D_1 \cos\left(\omega_1 \frac{x}{a_1}\right) \right] \sin \omega_1 t + \\ &+ \left[ C_2 \sin\left(\omega_2 \frac{x}{a_1}\right) + D_2 \cos\left(\omega_2 \frac{x}{a_1}\right) \right] \sin \omega_2 t\end{aligned}\quad (3)$$

В результате получены зависимости, которые позволяют определить углы закручивания дисков модели и любого сечения упругого вала. На основании чего можно определить перемещение челнока с учетом податливости звеньев механизма и сравнить эту величину с цикловой диаграммой работы механизма.

#### Литература

1. Селезнев, С.В. Исследование динамики механизма привода челноков ленточкацкого станка [электронный ресурс]/С.В.Селезнев, Р.В. Шляпугин, Д.А. Пировгов//Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2016, №1(361). С. 142-147. ISSN 0021 – 3497. Режим доступа: [http://tp.ivgpu.com/?page\\_id=7977](http://tp.ivgpu.com/?page_id=7977)

УДК 621.771

А.Б. КОЛОБОВ, к.т.н., доцент;  
Ф.Б. ОГУРЦОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская, 34  
*E-mail: kolobov\_ab@mail.ru*

## Параметры спектрального анализа вибрации при диагностике зубчатой передачи

**Аннотация.** Предложен выбор разрешающей способности спектрального анализа вибрации для задач эксплуатационной диагностики, позволяющий диагностировать распространенные одиночные и агрегированные дефекты зубчатых передач без снижения достоверности диагноза.

**Ключевые слова:** зубчатая передача, вибрационная диагностика, спектральный анализ вибрации, дефекты, информативные частоты, гистограммы.

A.B. KOLOBOV Candidate of Engineering, Associate Professor;  
F.B. OGURTSOV, Candidate of Engineering, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: kolobov\_ab@mail.ru*

## Parameters of the spectral analysis of vibration at diagnostics of the tooth gearing

**Abstracts.** The choice of resolution of the spectral analysis of vibration for problems of operational diagnostics allowing to diagnose the widespread single and aggregated defects of tooth gearings without decrease in reliability of the diagnosis is offered.

**Key words:** tooth gearing, vibrational diagnostics, spectrum analysis of vibration, defects, the informative frequencies, histograms.

Достоверность диагноза при диагностике по прямому спектру или спектру огибающей вибрации зависит от технических возможностей применяемого спектроанализатора, в частности, – от его частотного разрешения [2]. Высокое разрешение пропорционально ценовой категории, что существенно снижает рентабельность и доступность диагностики механизмов в ходе эксплуатации.

В данной работе оценена приемлемая для задач эксплуатационной вибродиагностики зубчатой передачи разрешающая способность спектрального анализа.

Объектом является двухступенчатый горизонтальный цилиндрический редуктор с прямым приводом через упругую муфту от электродвигателя с частотой вращения 2937 мин<sup>-1</sup>. Кинематические характери-

ки редуктора: число зубьев зубчатых колес (1 ступень)  $z_{11} = 35$ ;  $z_{12} = 88$  и (2 ступень)  $z_{21} = 43$ ;  $z_{22} = 135$ .

Анализировалась вибрация на подшипниковых узлах в радиальных поперечных направлениях. Характерные частоты, присутствующие в прямых спектрах и спектрах огибающей вибрации, составляют:

- оборотные частоты соответственно, ведущего  $f_{o1} = 48,9$  Гц, промежуточного  $f_p = 19,5$  Гц и ведомого  $f_{o2} = 6,2$  Гц валов;
- зубцовые частоты, соответственно, 1 ступени  $f_{z1} = 1713,3$  Гц и 2 ступени  $f_{z2} = 837,2$  Гц.

Также определены «промежуточные» частоты, представляющие собой результат резонансных возбуждений при ударных процессах в зацеплении, соответственно для 1 ступени:  $f_{m11} = 881,1$  Гц и  $f_{m12} = 866,4$  Гц; 2 ступени:  $f_{m21} = 428,3$  Гц и  $f_{m22} = 421,7$  Гц.

Спектры зубчатых передач содержат как синхронные составляющие (гармоники, пропорциональные оборотным частотам), так и несинхронные, вызванные резонансными процессами, и некратные частоте вращения. В бездефектном состоянии их амплитуды малы.

При эксплуатационных дефектах свойства вибросигнала (дамп и спектр вибрации, особенно спектр огибающей) значительно изменяются. В спектрах меняются соотношения между основными частотами возбуждения, появляются новые спектральные компоненты, в частности боковые полосы зубцовых и «промежуточных» частот, а также их гармоник, вызванные модуляцией оборотными частотами.

Рассчитаны частотные признаки более 20 видов дефектов зубчатой передачи, которые могут присутствовать в прямых спектрах и спектрах огибающей [1, 3]. Частотные признаки основных эксплуатационных дефектов приведены ниже:

- *бой ведущего/ведомого зубчатого колеса*  $i = 1,2$  ступени связанный, как правило, с несоосностью зубчатого колеса и вала или искривлением вала:

- вибрация на гармониках  $kfo_i$ ,  $kfp$  и  $kfz_i$ ;
- наличие боковых составляющих гармоник зубцовых частот

$$kfz_i \pm fo_1 \text{ и } kfz_i \pm fo_2, \quad kfz_i \pm fn;$$

- *износ зубьев ведущего/ведомого зубчатого колеса*  $i = 1,2$  ступени, вызывающий увеличение зазора между профилями зубьев и приводящий к ударному режиму возбуждения вибрации:

- вибрация на гармониках  $kfo_i$ ,  $kfp$  и  $kfz_i$ ;
- наличие «промежуточных» частот  $f_{mii}$  с боковыми составляющими

$$mfm_{11} \pm nfo_1 \text{ и } mfm_{12} \pm nfo_1;$$

$$mfm_{21} \pm nfo_2 \text{ и } mfm_{22} \pm nfo_2; \quad mfm_{iii} \pm nfn;$$

- *трещины, излом, скопы и, схожий с ними, питтинг зубьев ведущего/ведомого зубчатого колеса*  $i = 1,2$  ступени, вызывающий:

– увеличение глубины амплитудной модуляции на комбинационных частотах

$$mfz1 \pm nfo1, \quad mfz2 \pm nfo2, \quad mfzi \pm nfn;$$

– рост боковых составляющих «промежуточных» частот

$$mfmii \pm nfoi \quad \text{и} \quad mfmii \pm nfn.$$

Расчетный анализ произведен при кратностях синхронных компонент  $k = 1; 2; 3$  (гармоники оборотных частот  $kfo1, kfn$  и  $kfo2$ ),  $k = 0,5; 2; 3; 4$  (гармоники зубцовых частот  $kfz1$  и  $kfz2$ ), номерах гармоник и боковых полос  $m = 1; 2$  и  $n = 1; 2$  при амплитудной модуляции зубцовых и «промежуточных» частот (как синхронных, так и несинхронных компонент). При анализе информативных частот не учитывались подшипниковые частоты опор валов редуктора.

Расчитаны вероятности появления информативных частот в трех частотных интервалах:

- низкочастотный, до 100 Гц (НЧ) – вероятность 0,184;
- среднечастотный от 100 до 2000 Гц (СЧ) – вероятность 0,617;
- высокочастотный, более 2000 Гц (ВЧ) – вероятность 0,199.

Построены гистограммы распределения числа появления частотных признаков дефектов при различной ширине спектральной линии в указанных полосах частот и оценено влияние разрешающей способности спектра на результат диагностирования.

Из анализа гистограмм следует, что имеются 4 узкие группы, вызванные, в том числе, модуляционными компонентами:

- гармоники оборотной частоты  $fo1$ ;
- вблизи «промежуточной» частоты 2 ступени  $fm2$  при модуляции оборотными частотами  $fn, fo2$  и их гармониками;
- вблизи зубцовой частоты 2 ступени  $fz2$  и «промежуточной» частоты 1 ступени  $fm1$  при модуляции оборотными частотами  $fo1, fn, fo2$  и их гармониками;
- вблизи зубцовой частоты 1 ступени  $fz1$  при модуляции оборотными частотами  $fo1, fn, fo2$  и их гармониками.

Анализ показывает, что для выполнения эксплуатационной вибродиагностики зубчатых передач, при условии обеспечения достоверности и высокой экономичности, достаточно применение спектроанализаторов с разрешающей способностью не менее 5 Гц.

Отметим, что спектры вибрации зубчатых передач содержат значительную шумовую компоненту, дисперсия которой существенно меняется как от нагрузки, так и от износа зубьев. Шумовая компонента представляет собой белый шум, наложение которого на собственные частоты деталей передачи приводит к резонансам и появлению новых спектральных составляющих, что практически невозможно смоделировать и не учитывалось в данной работе.

### Литература

1. **Генкин, М.Д.** Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д.Генкин, А.Г.Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. **Клюев, В.В.** Неразрушающий контроль: Справочник. В 7 т. Т.7. Вибродиагностика / В.В.Клюев и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 732 с.
3. **Колобов, А.Б.** Основы теории и практики вибродиагностики: учеб. пособие / А.Б.Колобов; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина». – Иваново, 2014. – 248 с.

УДК 621.833

Ф.Б. ОГУРЦОВ, к.т.н., доцент;  
А.Б. КОЛОБОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: kolobov\_ab@mail.ru*

### Выделение огибающей вибрации с использованием ортогональных полиномов Лежандра

**Аннотация.** Предложен алгоритм выделения огибающей вибрации с использованием ортогональных полиномов Лежандра; разработана программа, выделяющая локальные максимумы вибрации, и реализующая поинтервальную аппроксимацию полиномами огибающей сигнала вибрации.

**Ключевые слова:** временной сигнал вибрации, подшипник качения, вибрационная диагностика, массив локальных минимумов, аппроксимация, полиномы.

F.B. OGURTSOV, Candidate of Engineering, Associate Professor;  
A.B. KOLOBOV, Candidate of Engineering, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: kolobov\_ab@mail.ru*

### Allocation of the bending-around vibration with use orthogonal polynoms of Legendre

**Abstract.** The algorithm of allocation of the bending-around vibration with use of orthogonal polynoms of Legendre is offered; the program allocating local maxima of vibration, and realizing pointintervalny approximation by polynoms of the vibration which is bending around a signal is developed.

**Key words:** time signal of vibration, rolling bearing, vibration diagnostics, massif of local minima, approximation, polynoms.

В настоящее время получили практическое применение методы диагностики подшипников качения основанные на анализе высокочастотной вибрации, возникающей в процессе работы подшипника, измеренной на корпусе подшипникового узла, в частности, – метод ударных

импульсов [1, 2]. Однако результаты анализа во многом зависят от способа выделения огибающей вибрационного сигнала и технических характеристик используемой аппаратуры, и в общем случае оказываются несопоставимыми для различной аппаратуры [3].

В данной работе исследуется возможность методики выделения огибающей, основанной на разложении по ортогональным полиномам.

Исходной информацией для анализа является сигнал виброускорения на корпусе подшипникового узла, выделенный с помощью полосового фильтра. Конкретный вид такого сигнала существенно зависит от параметров измерительной аппаратуры. Значительно более стабильно значение всплесков амплитуды сигнала (далее – локальных максимумов) и время их появления. Физически появление локального максимума соответствует моменту выделения энергии в результате изменения условий контакта между телами качения и беговыми дорожками подшипника. В связи с этим на первом этапе диагностики предлагается из временного дампа сформировать массив локальных максимумов. Полученный двумерный массив данных (амплитуда максимума и время его появления) обладает аппаратурной независимостью, однако применить спектральный анализ в этом случае невозможно. Поэтому далее предлагается производить сплайн-интерполяцию дискретного массива системой гладких функций. При этом исследовалась возможность использования для интерполяции полиномов Лежандра.

Алгоритм интерполяции предполагает разбиение массива данных на интервалы с переменной длиной, причем размер каждого интервала аппроксимации определялся по условию попадания в него  $N$  значений исходного массива. Каждый последующий интервал формировался аналогично предыдущему со смещением по времени на один элемент массива. При этом реальные значения времени  $t$  появления локального максимума в процессе аппроксимации приводятся к безразмерным значениям  $\tau$  для данного интервала интерполяции следующим образом

$$\tau_j = \frac{2(t_{j+i} - t_{i+(N-1)/2})}{t_{i+N-1} - t_i}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер интервала интерполяции;  $j = 0, \dots, N-1$  – смещение номера локального максимума относительно номера интервала.

В результате предварительного исследования было установлено, что при вычислении коэффициентов полиномов условие ортогональности в общем случае перестает выполняться, поскольку временной интервал между локальными максимумами является случайной величиной. Кроме того, при отсутствии граничных условий не обеспечивается удовлетворительная стыковка на границах интервалов. Как следствие, сходимость полученного ряда отсутствует, а вариация коэффициентов полиномов по времени приобретает характер белого шума.

Существенно повысить устойчивость результатов аппроксимации удалось за счет введения дополнительных взвешивающих функций. При этом весовые коэффициенты полиномов на данном интервале  $i$  определялись как

$$a_{i,n} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} (x_{i+j} \cdot L_n(\tau_j) W_{1,j} W_{2,j})}{\sum_{j=0}^{N-1} (L_n(\tau_j) W_{1,j} W_{2,j})^2}, \quad (2)$$

где  $n$  – порядок полинома;  $L_n$  – полином Лежандра порядка  $n$ ;  $x_{i+j}$  – амплитуда  $(i+j)$ -го локального максимума;  $W_{1,j}$ ,  $W_{2,j}$  – взвешивающие функции.

Проблема вариации времени интервала частично решается за счет введения функции  $W_1$ , которая придает меньший вес близко расположенным отсчетам. Значение весовой функции  $W_1$  в  $j$ -х точках определяется формулой:

$$W_{1,j} = \frac{t_{j+1} - t_j}{T_{cp}}, \quad (3)$$

где  $T_{cp}$  – средний период появления локальных максимумов.

Для обеспечения стыковки рассматриваемых интервалов между собой, целесообразно применение весовой функции  $W_2$ . В качестве такой функции было выбрано расширенное окно Хэмминга, отличающееся наличием плоского участка в середине интервала.

Значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов Лежандра, полученные по формуле (2), могут далее использоваться для формирования сигнала огибающей. На рис. 1 представлен результат обработки дампа виброускорения для подшипника типоразмера 302 в пределах одного интервала.

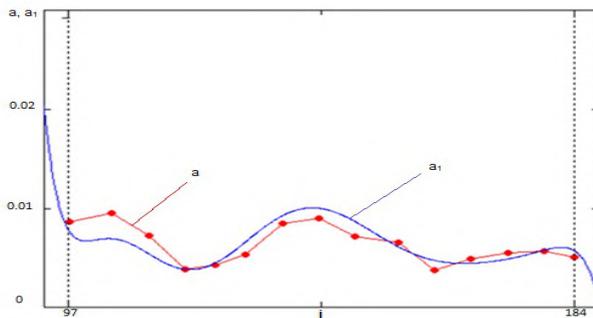


Рис. 1. Дискретные значения локальных максимумов интервала ( $a$ ) и аппроксимирующая функция ( $a_1$ )

Как видно из рис. 1, в результате расчета обеспечена вполне удовлетворительная сходимость ряда.

Вопрос о практической применимости метода для целей технической диагностики требует дополнительных исследований.

#### Литература

1. **Барков, А.В.** Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев.– СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000.– 159 с.
2. **Клюев, В.В.** Неразрушающий контроль. В 7 т. Т.7. Вибродиагностика / В.В.Клюев и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 732 с.
3. **Колобов, А.Б.** Основы теории и практики вибродиагностики: учеб. пособие / А.Б.Колобов; ФГБОУ ВПО ИГЭУ им. В.И.Ленина. – Иваново, 2014. – 248 с.

УДК 621.01

Ю.Е. ФИЛАТОВ, к.т.н., доцент,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: tipm@tipm.ispu.ru*

### К расчету коэффициента чувствительности при вибродиагностике по вектору собственных частот

**Аннотация.** Предложена новая редакция формулы для расчета матрицы чувствительности при вибродиагностике по смещению спектра собственных частот дискретной линейной механической колебательной системы цепного типа.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, линейная механическая система, цепной тип, собственные частоты, собственная форма колебаний, матрица чувствительности.

Yu.E. FILATOV, phd of Engineering, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: tipm@tipm.ispu.ru*

### To calculation for the sensitivity coefficient in vibration diagnostic using a vector of natural frequencies

**Abstract.** It is proposed a new variety of formula for calculating sensitivity matrix in vibration diagnostic using change of the natural frequency spectrum in the linear discrete chain mechanical system.

**Key words:** vibration diagnostic, linear mechanical system, type of chain, natural frequencies, natural modes, sensitivity matrix.

В работах [1, 2] рассмотрена задача оценки параметров состояния диагностируемого объекта, описываемого как дискретная линейная механическая колебательная система, по известному относительно небольшому смещению спектра собственных частот. По изменению параметров состояния ведется оценка конструктивно-технологических отклонений от номинальных значений в диагностируемом объекте.

Для решения поставленной задачи используется математическая модель диагностируемого объекта в виде системы дифференциальных уравнений движения или в векторно-матричной форме.

$$A\ddot{X} + B\dot{X} + CX = F,$$

где  $A, B, C \in R^{n \times n}$  — соответственно матрицы инерции, демпфирования и жесткости размера  $n \times n$ , элементы которых могут быть искомыми параметрами состояния ( $Z$ );  $\ddot{X}, \dot{X}, X \in R^n$  — соответственно векторы виброускорения, виброскорости и виброперемещения;  $F \in R^l$  — вектор внешних возмущений или тестового сигнала ( $l \leq n$ ).

Применение такой математической модели представляет определенные сложности. Поэтому, используя разложение в ряд Тейлора по совокупности всех аргументов, и с учетом достаточно малого диапазона возможных изменений параметров состояния, пренебрегая членами высших порядков, формируют упрощенную математическую модель диагностируемого объекта в виде линейной системы алгебраических уравнений – уравнений приращений:

$$\Delta S_j(\bar{Z}_0 + \Delta \bar{Z}) \approx \sum_{i=1}^n u_{ij} \cdot \Delta Z_i,$$

где  $\Delta S_j(\bar{Z}) = S_{j3}(\bar{Z}) - S_j(\bar{Z}_0)$  – величина отклонения измеренного диагностического сигнала  $S_{j3}$  от расчетного  $S_j$  при номинальном векторе состояния  $\bar{Z}_0$ ;  $(\partial S_j / \partial Z_i)_0 = u_{ij}$  – коэффициент чувствительности первого порядка параметра сигнала по входному параметру; вычисляемый при  $\bar{Z} = \bar{Z}_0$ . Он служит мерой информативности диагностического признака о параметре состояния.

Собственные значения уравнения движения должны удовлетворять равенству  $(A\omega^2 + B\omega + C)X = 0$ .

Здесь  $\omega$  – вектор собственных частот системы,  $\omega \in [\omega_1 = \omega_{\min}, \omega_2 = \omega_{\max}]$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – нижняя и верхняя границы диапазона частот.

Для определенного значения  $\omega = \omega_i$  это уравнение принимает вид

$$(A\omega_i^2 + B\omega_i + C)X_i = 0, \quad \text{или} \quad T_i X_i = 0,$$

где  $X_i$  – вектор перемещений, описывающий форму колебаний при данной частоте;  $T_i = A\omega_i^2 + B\omega_i + C$  – интегральный оператор Лапласа.

Данной системе соответствует только один вектор собственных частот.

Для консервативной механической колебательной системы  $B = 0$  и матрицы чувствительности имеет вид:

$$u_{ik} = \frac{\partial \omega_i}{\partial c_k} = \frac{X_i^T \left( \frac{\partial C}{\partial c_k} \right) X_i}{2 \omega_i X_i^T A X_i}.$$

Пусть по результатам прямых измерений резонансных частот диагностируемого объекта, обнаружено их смещение относительно номинальных значений. По этой матрице чувствительности можно определить изменение соответствующих жесткостей и судить о присутствии дефекта в системе.

Пусть диагностируемый объект относится к системам цепного типа, представляющим например, последовательную цепочку упруго связанных масс  $m_j$ , имеющих возможность совершать колебания вдоль прямой, или многодисковую систему, совершающую крутильные колебания. Особенности диагностируемого объекта как дискретной линейной механической колебательной системы позволяют получить другой вариант расчета матрицы чувствительности.

В такой системе матрица инерции является диагональной матрицей размера  $n \times n$  и знаменатель коэффициента чувствительности имеет вид

$$2 \omega_i X_i^T A X_i = 2 \omega_i \sum_{j=1}^n m_j x_{ji}^2 = 4 T_i / \omega_i,$$

где  $T_i$  – максимальное значение кинетической энергии тел (в относительных единицах) на  $i$ -той частоте, которое равно максимальному значению потенциальной энергии на той же частоте;  $x_{ji}$  – относительные амплитуды перемещений масс при данной частоте как компоненты вектора собственных форм колебаний.

В такой системе соответственно матрица жесткости является ленточно-диагональной матрицей размера  $n \times n$  и производной от матрицы жесткости по  $k$ -й жесткости ( $c_k$ ) будет минор размера  $2 \times 2$  вида

$$\begin{vmatrix} +1 & -1 \\ -1 & +1 \end{vmatrix}.$$

Для упругой связи массы с корпусом (неподвижным) этот минор выродается в элемент, равный единице. Если крайние массы упруго связаны с корпусом, то число жесткостей на единицу больше числа масс ( $k = 1, \dots, n+1$ ), а если не связаны, то на единицу меньше ( $k = 1, \dots, n-1$ ). Соответственно числитель коэффициента чувствительности имеет вид

$$(x_{ki} - x_{k+1,i})^2,$$

то есть равен квадрату деформации упругого элемента при  $i$ -й собственной форме на  $i$ -й частоте. Для крайних жесткостей, связывающих массы с корпусом, имеем  $(x_{1,i})^2$  или  $(x_{n+1,i})^2$ .

Таким образом, матрица чувствительности получает вид

$$u_{ik} = \frac{\partial \omega_i}{\partial c_k} = \frac{(x_{ki} - x_{k+1,i})^2}{2\omega_i \sum_{j=1}^n m_j x_{ji}^2},$$

что очевидно проще для вычислений.

#### Литература

1. **Кораблев С.С.**, Шапин В.И., Филатов Ю.Е. Вибродиагностика в прецизионном приборостроении. Л. Машиностроение, 1984, 84 с.
2. **Кораблев С.С.**, Крылов Н.И. Задача инверсной чувствительности в диагностике линейных механических систем. В сб. Динамика и колебания механических систем. Межвуз. сб. ст. (вып.7) Иваново, 1979.

УДК 531.7

Е.Э. ИЛЬИНА, студент;  
М.А. НОЗДРИН, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
E-mail: nozdrin@tipm.ispu.ru

### Механические испытания металлических пеноматериалов с памятью формы

**Аннотация.** Рассматриваются механические испытания метастабильных пен из сплава с памятью формы на основе титана. Рассчитывается пористость полученных образцов с целью определения оптимального варианта металлической пены для создания костного имплантата.

**Ключевые слова:** механические испытания, метастабильные пены, пористость, имплантат.

Е.Е. ILYINA, student;  
M.A. NOZDRIN, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: nozdrin@tipm.ispu.ru

### Mechanical tests of the alloy foams with shape memory

**Abstract.** Considered mechanical tests of the metastable alloy foams with shape memory. Porosity of the obtained samples is evaluated to determine the optimal variant to generate metal foam for bone implant.

**Key words:** mechanical tests, metastable foam, porosity, implant.

В последние годы наблюдается существенная потребность в разработке материалов, заменяющих поврежденные кожные покровы, мы-

щечную ткань, кровеносные сосуды, нервные волокна, костную ткань. Такие материалы получили название биоматериалов.

Биоматериалы (имплантаты) должны обладать определенными химическими (отсутствие нежелательных химических реакций с тканями и межтканевыми жидкостями, отсутствие коррозии), механическими (прочность, стойкость к образованию трещин, сопротивление замедленному разрушению, износостойкость) и биологическими свойствами (отсутствие реакций со стороны иммунной системы, консолидация с костной тканью, стимулирование остеогенеза).

Для использования в качестве биоматериалов широко изучаются метастабильные сплавы на основе титана. Среди них выделяют группу сплавов, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ) [1].

Среди всех сплавов с памятью формы для медицинского применения наиболее распространены сплавы на основе титан-никель (Ti-Ni). Однако они содержат токсичный никель, поэтому в настоящее время привлекает внимание другая группа перспективных сплавов – это безникелевые сплавы с памятью формы на основе Ti. Основной интерес к этим сплавам объясняется их низким модулем Юнга, содержанием только нетоксичных элементов, таких как ниобий (Nb), тантал (Ta) и цирконий (Zr), и тем, что они обладают сверхупругим поведением при комнатной температуре.

При механических воздействиях в области контакта кости с металлом основную нагрузку на себя берет имплантат. Это ведет к последующему разрушению костной ткани. Требуется, чтобы жесткость имплантата была значительно ниже жесткости плотного металла. Поэтому в настоящее время ведется разработка пеноматериала из сплавов Ti-Nb-Zr/Ta.

Механические свойства сплавов Ti-Nb-Zr/Ta являются структурно-чувствительными параметрами, зависят от размеров и формы пор в структуре, от плотности их дислокации, от количества фазовых превращений материала, а также от разницы в диапазоне температур мартенситных превращений и температур испытания. На механические свойства влияет дополнительная термообработка (закалка, старение, термоциклическая обработка, низко- и высокотемпературная механическая обработка).

В Московском институте стали и сплавов (МИСиС) совместно с Высшей технологической школой (ETS, Монреаль, Канада) ведется разработка новой технологии создания метастабильных пеноматериалов. Она основана на методе удаляемого порообразователя. Эта методика включает в себя пять этапов: изготовление и фракционирование порошков, смешивание, прессование (компактирование), пиролиз и спекание [2].

На первом этапе работы используют металлический порошок и полимер-порообразователь. Согласно литературным и экспериментальным данным металлический порошок должен соответствовать двум

критериям: форма частиц близка к сферической, размер частиц не превышает 50 мкм.

Важным этапом в создании пеноматериала является перемешивание. Так как плотность этих материалов значительно различается, разрабатывают специальное оборудование для улучшения равномерности перемешивания.

Полученная равномерная смесь порошков засыпается в прессформу. Компактирование позволяет получать запрессовки с соотношением высоты к диаметру до 2:1, что необходимо для механических испытаний.

Для удаления порообразователя производят процесс пиролиза в вакуумной печи. Для упрочнения связи между частицами необходимо провести спекание – диффузионный процесс, проводимый при температуре ниже температуры плавления. В результате спекания образцы преобразуются в прочное тело, близкое по свойствам к плотному материалу из этого же сплава.

Изготовление сверхупругого биосовместимого сплава, пористость которого можно было бы контролировать, представляет собой актуальную задачу для медицинского материаловедения. Для всех пеноматериалов, которые вживляются в кость, наиболее подходящей является пористость, обладающая размером пор 100-600 мкм. Данный размер является приемлемым, так как именно в таких порах может поселиться и начать развиваться клетка костной ткани, что ускоряет процесс вживления имплантата.

Для определения открытой пористости получают значения веса при разных условиях. Образцы взвешивают, фиксируя вес в сухом состоянии ( $D$ ). Затем их подвергают кипячению для полного насыщения всех доступных пор. После кипячения образцы помещают на чашу весов, находящуюся в воде, и измеряют вес в «подвешенном» состоянии ( $S$ ). Далее достают из воды, быстро протирают сырой тканью для удаления только поверхностного слоя влаги и производят определение веса во влажном состоянии ( $W$ ).

Значение открытой пористости рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{W - D}{W - S}.$$

Пористость полученных образцов не всегда соответствует требованиям по размеру пор и значению проницаемости. Поэтому разработан метод динамического химического протравливания, позволяющий управлять пористостью и проницаемостью пеноматериалов [3].

Следует отметить, что данный метод эффективен, но сопровождается понижением прочностных характеристик. Поскольку пеноматериалы из сверхупругого сплава Ti-Nb-Zr обладают существенным преимуществом в прочности перед костью, можно ожидать сохранения достаточного уровня прочности после травления.

Разработанная методика позволяет получить характеристики материала, по которым планируется создать модель стоматологического неразборного имплантата цилиндрической формы и оценить характер поведения при многоцикловом нагружении. Выбранный подход не дает явной оценки момента разрушения конструкции, но позволяет получить наглядную картину степени поврежденности конструкции на основе используемых моделей накопления повреждений. Степень поврежденности определяет оценку ресурса конструкции.

### Литература

1. **Brailovski, V.** Bulk and porous metastable beta Ti–Nb–Zr(Ta) alloys for biomedical applications / V. Brailovski, S. Prokoshkin, M. Gauthier, K. Inaekyan, S. Dubinskiy, M. Petrzhik, M. Filonov // *Materials Science and Engineering*, 2011, p. 643–657
2. **Rivard, J.** Fabrication, morphology and mechanical properties of Ti and metastable Ti-based alloy foams for biomedical applications /J. Rivard, V. Brailovski, S. Dubinskiy, S. Prokoshkin // *Materials Science and Engineering*, 2014, p. 421-433
3. **Шереметьев, В.А.** Влияние динамического химического протравливания на параметры пористой структуры пеноматериала из сверхупругого сплава Ti-Nb-Zr медицинского назначения./ В.А. Шереметьев, С.М. Дубинский, М.А. Икбаль, А.А. Коробкова, А.М. Казакбиев, С.Д. Прокошкин, В. Браиловский // *Перспективные материалы и технологии*. – М., 2016.

УДК 531:004.94

А.Р. ЗВОЛИНСКАЯ, студент; М.А. НОЗДРИН, к.т.н., доцент;  
Н.А. САБАНИЕВ, старший преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: nozdrin@tjpm.ispu.ru*

## Топологическая оптимизация конструкций в ANSYS

**Аннотация.** Исследуется лонжерон лопасти винта вертолета с использованием модуля топологической оптимизации программного комплекса ANSYS.

**Ключевые слова:** топологическая оптимизация, ANSYS, лопасть винта вертолета.

A.R. ZVOLINSKAYA, student;  
M.A. NOZDRIN, Candidate of Engineering, Associate Professor;  
N.A. SABANEEV, senior teacher

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: nozdrin@tjpm.ispu.ru*

## Topological optimization of structures in ANSYS

**Abstract.** The module of topological optimization of the ANSYS software complex was studied for the spar of the rotor helicopter blade.

**Key words:** topological optimization, ANSYS, helicopter screw blade.

Современные программные комплексы позволяют проводить оптимизационные расчеты путём снижения веса и сокращения расхода материалов на изготовление деталей и конструкций. Одним из таких методов является топологическая оптимизация в программном комплексе ANSYS.

Под оптимизацией топологии понимают изменения в конструкции, включающие создание новых границ тела и удаление существующих. Целью топологической оптимизации является увеличение или уменьшение заданного свойства конструкции при удовлетворении определенных условий.

Данная функция доступна в отдельном модуле программного комплекса ANSYS «Topological optimization» (Топологическая оптимизация). Программный комплекс ANSYS является универсальной программой, принцип работы которой основан на методе конечных элементов.

Для использования функции топологической оптимизации накладываются некоторые ограничения на рассматриваемую деталь и нагрузки. Деталь должна быть линейна, а нагрузки должны быть статическими. Соблюдение данных ограничений ведет к корректной работе программы.

Топологическая оптимизация, выполняемая средствами программного обеспечения ANSYS, выполняется в несколько этапов.

На первом этапе проводится постановка и решение прочностной задачи методом конечных элементов в ANSYS Mechanical. Для этого задается контурная геометрическая область конструкции, ее механические свойства, условия закрепления и действующие нагрузки.

После решения прочностной задачи начинается непосредственная работа по топологической оптимизации конструкции. Формулируется целевая функция – снижение податливости конструкции, испытывающей один или несколько вариантов нагружения, увеличение собственных частот, ограничение по деформации или иная. Для корректной работы алгоритма описывается пространство проектирования: определяется область конструкции, топология которой может меняться, и область, для которой изменения запрещены.

Дополнительное удобство обеспечивают инструменты, контролирующие возможность изготовления получаемой топологии. Эти инструменты позволяют требовать соблюдения линейной или циклической симметрии топологии, проверять возможность изготовления детали путем литья или фрезеровки, отсутствие внутренних полостей. Также возможен контроль минимального или максимального размера вновь получаемых элементов топологии конструкции.

После задания всех необходимых настроек алгоритма оптимизации остается указать желаемый процент снижения материалоемкости и запустить расчет. По итогам расчета ANSYS Mechanical позволяет экспортировать полученную топологию в формате STL. На этом можно заканчивать

оптимизацию, но программное обеспечение ANSYS позволят сделать намного больше, а именно, выполнить поверочный расчет [1].

В данной работе функция топологической оптимизации применяется к созданию более эффективной геометрии лонжерона лопасти несущего винта вертолета (рис. 1).

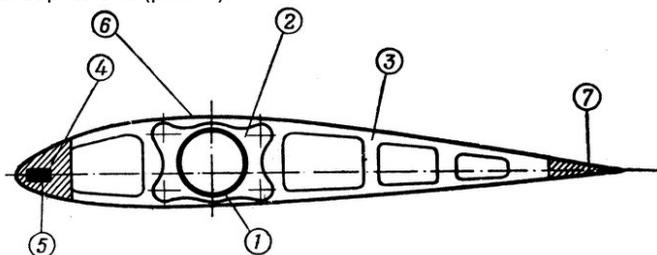


Рис. 1. Устройство лопасти несущего винта:

1 – лонжерон; 2 – розетка; 3 – нервюра; 4 – носовой стрингер; 5 – противовес;  
6 – обшивка; 7 – хвостовой стрингер

Несущий винт является важнейшей частью вертолета. Основным назначением несущего винта является создание подъемной силы на всех режимах полета и сил, обеспечивающих поступательное перемещение вертолета в заданных направлениях. Помимо этого, несущий винт создаст устойчивость вертолету и используется для управления им. Несущий винт состоит из лопастей и втулки. Лопасти создают требуемую подъемную силу. Втулка представляет собой кинематический механизм, обеспечивающий движение и угловые перемещения лопасти в вертикальной и горизонтальной плоскости под воздействием аэродинамических и инерционных сил, а также поворот лопасти для управления её подъемной силой. Силовым элементом лопасти является лонжерон, а нервюры, стрингеры и обшивка лишь передают на него нагрузки. Лонжерон имеет форму носовой части лопасти. В комлевой части лонжерона находится стальной узел крепления лопасти к втулке. Он крепится к лонжерону на болтах и клее. Для статической балансировки лопасти лонжерон имеет торцевую и комлеву балансирующие камеры. В носовой части лонжерона, защищенной от абразивного износа светоозоностойким резиновым покрытием, расположен центровочный груз, залитый в латунную оковку. К задней части лонжерона приклеены хвостовые секции, которые состоят из тонкой стеклопластиковой обшивки и легкого наполнителя, склеенных между собой [2].

Создав контурную геометрию, следует уделить особое внимание разбиению на конечно элементную сетку операцией Mesh. Для того чтобы оценить качество сетки, необходимо воспользоваться функцией Mesh Statistics (Статистика). Элементы разбиения должны лежать в

диапазоне от 0,4 до 1, так как это обеспечивает наиболее точный результат вычислений.

Следующим этапом задаются нагрузки и закрепления на лонжерон лопасти несущего винта. Закрепление у основания заедается как жёсткая заделка. Задаются подъёмные силы, сила тяжести и сила инерции.

Результаты расчёта выводятся через эпюры деформаций и напряжений. Статическая задача решена, следующий шаг оптимизация.

Топологическая оптимизация задаётся как любая другая функция в ANSYS. Результаты визуализируются с помощью ползунка, оптимальное сокращение объёмов должны быть в диапазоне от 0,4 до 0,6 по шкале от 0 до 1. Это обеспечивает баланс между уменьшением материала конструкции и сохранением запаса прочности.

Топологическая оптимизация показала возможность уменьшения стенки лонжерона и добавления отверстий для облегчения конструкции лопасти несущего винта вертолёта.

#### Литература

1. **Режим доступа:** <https://www.multiphysics.ru/stati/topologicheskaja-optimizaciia-konstrukcii-v-ansys-mechanical.htm>
2. **Режим доступа:** <http://www.transportsolve.ru/ske-982.html>

УДК 677.03.004.182

Т.В. ШМЕЛЕВА<sup>1</sup>, к.т.н., доцент;  
Е.В. ВИНОГРАДОВА<sup>2</sup>, к.т.н., доцент;  
Е.В. ЗАРУБИНА<sup>3</sup>, к.т.н., доцент;  
О.Н. ВОЛЫНКИН<sup>2</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

<sup>2</sup>Ивановский государственный политехнический университет  
153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, 20

<sup>3</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33  
*E-mail: tiktr7@mail.ru Шмелева Т.В.*

### Малоотходная технология производства продукта из льносырья

**Аннотация.** Предлагается методика оценки эффективности использования отходов производства медицинской льносодержащей гигроскопической ваты и нетканого полотна для увеличения выхода продукции на основе применения уравнений баланса сырья и энергии.

**Ключевые слова:** лен, медицинская вата, технологическая линия, баланс сырья, непрерывная регенерация сырья.

T.V. SHMELYOVA<sup>1</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor;  
E.V. VINOGRADOVA<sup>2</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor;  
E.V. ZARUBINA<sup>3</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor;  
O. N. VOLYNKIN<sup>2</sup>, graduate student

<sup>1</sup>Ivanovo State Power University, Ivanovo  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

<sup>2</sup>Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo,  
153037 Ivanovo, 8 March, 20

<sup>3</sup>Ivanovo Fire-Rescue Academy of State Firefighting Service of EMERCOM of Russia,  
153040 Ivanovo, Prospekt Stroiteleyi, 33  
*E-mail: tiktr7@mail.ru*

## Low-waste technology of rawflax product manufacture

**Abstract.** The methodology of assessment of efficiency of use of production waste containing medical absorbent cotton and nonwoven cloth to increase yield through the application of the equations of balance of raw materials and energy.

**Key words:** flax, medical cotton wool, technological line, balance of raw materials, continuous regeneration of raw materials.

Производство ваты из льна на всех стадиях ее выработки сопряжено с потерями хорошего прядомого волокна в отходы. Это связано с тем, что короткое льноволокно (отходы трепания или волокно после обработки короткостебельной льнотресты), а так же чёсанный лен и очёсы имеют в своем составе значительное количество сорных примесей, пороков, которые по технологии производства ваты подлежат отделению от волокна и удалению из волокнистого потока.

Для обеспечения полной сохранности прядомого волокна в волокнистом потоке, проходящем через очистительное оборудование в технологическом процессе, альтернативой является организация параллельно основному технологическому процессу, процесса непрерывной регенерации волокна из отходов, включающего сбор отходов от мест их выделения в агрегате, очистку от сорных примесей и пороков, получение регенерированного из отходов волокна и возвращение его в свой технологический процесс. Рассмотрим линию, предназначенную для получения медицинской гигроскопической ваты из отбеленного короткого льноволокна и нетканого полотна из отходов этого производства [1].

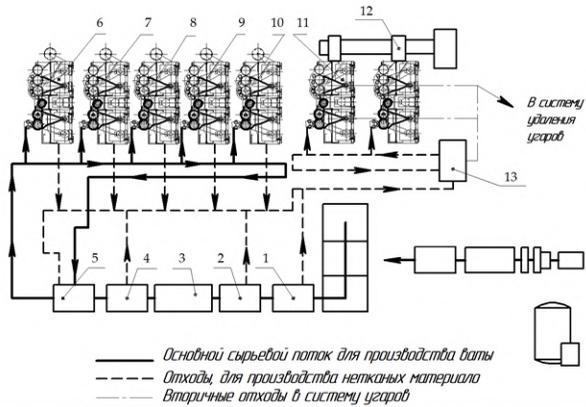


Рис. 2. Технологическая линия для выработки медицинской льносодержащей гигроскопической ваты и нетканого полотна из отходов этого производства: 1 – питатель П-5; 2 – разрыхлитель-очиститель РО; 3 – смеситель-накопитель СН-ЗУ; 4 – наклонный очиститель ОН-6-4; 5 – питатель резервный ПРЧ; 6, 7, 8, 9, 10 – основная группа разрыхлительно чесальных машин РЧВМ с ватными барабанами; 11, 12 – дополнительная группа разрыхлительно-чесальных машин РЧВМ, со слоеформирующим устройством; 13 – питатель П-5

Для технологической линии применим метод построения уравнений баланса сырья и энергии, служащих для анализа регенерации отходов, предложенный в статьях [2,3]. С учетом использования отходов собственного производства уравнение баланса сырья примет вид:

$$X_{\text{вых}} = X_{\text{вых}}^o + X_{\text{вых}}^{\Delta} \quad , \quad (1)$$

где

$$X_{\text{вых}}^o = \frac{X_1 \cdot \prod_{i=1}^2 (1 - \alpha_i) \cdot \prod_{j=4}^5 (1 - \alpha_j) \cdot \sum_{k=6}^{10} [\beta_k (1 - \alpha_k)]}{\sum_{m=6}^{10} \beta_m} \quad , \quad (2)$$

$$X_{\text{вых}}^{\Delta} = \frac{\left( \sum_{i=1}^2 X_i \alpha_i + \sum_{j=4}^{10} X_j \alpha_j \right) \sum_{k=11}^{12} [\beta_k (1 - \bar{\alpha}_k)]}{\sum_{k=11}^{12} \beta_k} \quad . \quad (3)$$

Здесь  $X_{\text{вых}}^{\Delta}$  – масса отходов собственного производства, формирующих нетканый материал;  $X_i$  – масса волокнистого потока на входе  $i$ -ой машины технологической линии;  $\alpha_i$  – доля отходов по массе на  $i$ -й машине технологической линии;  $\bar{\alpha}_k$  – доля вторичных отходов по

массе на  $k$ -ой машине технологической линии;  $\beta_k$  – коэффициент, учитывающий разделение волокон потока на составляющие параллельные потоки по разрыхлительно-чесальным машинам.

Коэффициент выхода продукта из смеси:

$$B = \frac{X_{\text{вых}}}{X_{\text{ex}}}.$$

Используем приведенный коэффициент выхода продукта из смеси к мощности, расходуемой на выпуск единицы количества продукта, так как осуществление процесса переработки собственных отходов приводит к повышению энергетических затрат на технологической линии

$$R = B \cdot \eta^{tr},$$

где  $R$  – приведенный коэффициент выхода продукта из смеси;  $\eta^{tr}$  – обобщенный технологический коэффициент полезного действия.

Существенно повысить указанный приведенный коэффициент выхода продукта из смеси позволяет переработка отходов собственного производства. Это происходит за счет увеличения массы готового продукта на величину массы сформированного нетканого полотна при незначительном снижении обобщенного технологического коэффициента полезного действия.

Улучшение технологического процесса по обработке сырья, происходит, за счет щадящей разработки волокнистого материала, а экономия сырья – за счет использования отходов собственного производства.

### Литература

1. Патент 140448 РФ, МПК D04H 1/02. Технологическая линия для выработки медицинской льносодержащей гигроскопической ваты и нетканого полотна из отходов этого производства / Зарубин В.М., Шмелева Т.В., Полякова Е.В., Куваева С.В. и др. Оpubл.10.05.2014. Бюл. №13.
2. Зарубин, В.М. Регенерация волокна из отходов на агрегате «кипа-лента» и его возврат в свой технологический процесс / В.М. Зарубин, Б.И. Минц, Т.В. Шмелева, Е.В. Полякова // Изв. Ивановского отделения Петровской академии наук и искусств. - Иваново, 2006. – С. 24-45.
3. Зарубин, В.М. Регенерация волокна из шляпочного очеса на шляпочной чесальной машине / В.М. Зарубин, Б.И. Минц, Т.В. Шмелева, Е.В. Полякова // Изв. Ивановского отделения Петровской академии наук и искусств. - Иваново, 2006. – С. 46-53.

УДК 62-232.1

И.Н. СОЛДАТОВ, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: soldatoff.igornikolaevitch@yandex.ru*

### **Разработка лабораторной работы по определению моментов инерции методом качания**

**Аннотация.** Разработана новая лабораторная работа по определению моментов инерции с целью повышения качества образовательного процесса.

**Ключевые слова:** момент инерции, метод качания, образовательный процесс.

I.N.SOLDATOV , Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: soldatoff.igornikolaevitch@yandex.ru*

### **Development of laboratory work on determination of moments of inertia by the method of swinging**

**Abstract.** New laboratory work is worked out on determination of moments of inertia with the purpose of upgrading of educational process.

**Key words:** the moment of inertia, the method of rocking, the educational process.

Теоретическая механика, как самостоятельная дисциплина или как раздел механики, является базовой дисциплиной по федеральному компоненту базовых дисциплин для большинства вузов технического профиля. Она закладывает основы знаний по решению проблем статики, кинематики и динамики различных механизмов.

Для изучения динамики необходимо знание студентами способов определения моментов инерции узлов и деталей. При изучении данного курса студенты испытывают определенные трудности с физическим представлением моментов инерции.

Для правильного силового расчета различных механизмов необходимо знать моменты инерции звеньев, которые зачастую определить теоретически невозможно, особенно у сложных деталей. В этих случаях особую актуальность приобретают практические методы определения моментов инерции.

Метод качания, или метод физического маятника, наиболее пригоден для звеньев механизмов, имеющих удлиненную форму (например, шатуны). Этот метод широко применяется на практике и дает достаточно точные результаты.

В предлагаемой лабораторной работе требуется определить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной плоскости его движения. Эту ось в дальнейшем будем называть «главной центральной осью вращения» (рис. 1).

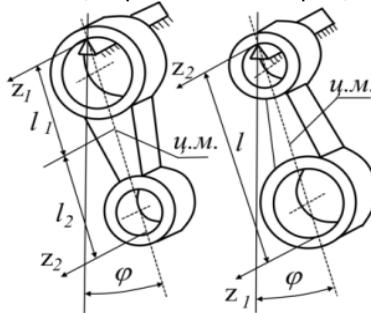


Рис. 1. Лабораторная конструкция для определения моментов инерции

Поставленная задача выполняется следующим образом. Испытуемое звено механизма подвешивают на горизонтальную призму так, чтобы главная центральная ось ее инерции была параллельна ребру призмы. Ребро призмы должно лежать в горизонтальной плоскости (рис. 1). Подвешенное таким образом звено механизма является физическим маятником.

Дифференциальное уравнение движения твердого тела относительно острой грани неподвижной призмы, при условии, что силами трения можно пренебречь (так как они малы по сравнению с другими силами), а звено совершает малые колебания, будет иметь такой вид:

$$I_z l_1 \cdot \varphi'' = F \cdot l_1 \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $I_z l_1$  – момент инерции испытываемого звена механизма относительно оси подвеса, кг·м<sup>2</sup>;

$\varphi''$  – угловое ускорение, рад/с<sup>2</sup>;

$F$  – сила веса испытываемого звена механизма, Н или (кг·м)/с<sup>2</sup>.

Момент инерции испытываемого звена механизма относительно оси подвеса  $z_1$ , совпадающей с острой гранью призмы

$$I_z l_1 = \left( \frac{T_1}{2\pi} \right)^2 2Fl_1, \quad (2)$$

где  $T_1$  – период свободных колебаний испытываемого звена механизма относительно оси  $z_1$ , с.

При проведении эксперимента удобно пользоваться не полным периодом колебаний, а полупериодом, то есть  $T_1^* = 0,5T_1$ . Тогда выражение (2) запишется так:

$$I_z l_1 = \left( \frac{T^*}{\pi} \right)^2 2Fl_1. \quad (3)$$

Момент инерции относительно главной центральной оси испытываемого звена механизма определится из выражения

$$I_c = I_{z1} + \frac{F}{g} l_1. \quad (4)$$

Если положение центра масс неизвестно, то есть неизвестно  $l_1$ , то в уравнении (3) – два неизвестных. Необходимо составить еще одно уравнение свободных колебаний относительно оси  $z_2$ , проходящей через другую точку подвеса испытываемого звена механизма (рис.1).

Считаем, что оси  $z_1$  и  $z_2$  принадлежат испытываемому звену и последовательно совмещаются с острой гранью неподвижной призмы

$$I_{z1} = \left( \frac{T_2^*}{\pi} \right)^2 2Fl_2, \quad (5)$$

где  $T_2^* = 0,5T_2$  – полупериод свободных колебаний испытываемого звена механизма относительно оси  $z_2$ .

Момент инерции относительно главной центральной оси в этом случае будет

$$I_c = I_{z2} + \frac{F}{g} l_2, \quad (6)$$

Расстояние между точками подвеса испытываемого звена механизма

$$l = l_2 + l_1, \quad (7)$$

Приравняв (4) и (6) с учетом (3), (5) и (7) и решив относительно  $l_1$ , получим

$$l_1 = \frac{\left| (T_2^*)^2 - \frac{\pi^2 l}{g} \right|}{(T_1^*)^2 + (T_2^*)^2 - 2\pi^2 / g'}. \quad (8)$$

Учитывая, что  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $\pi^2 = 9,86$ , положим что  $g = \pi^2$ .

$$l_1 = \frac{l \left[ (T_2^*)^2 - l \right]}{T_1^{*2} + T_2^{*2} - 2l}, \quad (9)$$

Ошибка в результате сделанного допущения не превышает 0,5%, а  $l_1$  определяется в метрах.

$$l_2 = \frac{l \left[ T_1^{*2} - l \right]}{T_1^{*2} + T_2^{*2} - 2l}, \quad (10)$$

Определив  $l_1$  из выражения (9) или  $l_2$  из выражения (10), находим момент инерции испытываемого звена механизма относительно главной центральной оси по формуле (4) или (6).

Курс лабораторных работ представляет собой поэтапное изучение методов практического определения моментов инерции различных деталей.

### Литература

1. **Яблонский, А.А.** Курс теоретической механики: [учебное пособие для вузов]. Ч. 1, Статика. Кинематика. Динамика / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – СПб.: Лань, 2007.
2. **Бутенин, Н.В.** Курс теоретической механики: учебник для вузов / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – СПб.: Лань, 2009.

УДК 534.014.4

Л.Н. КРАЙНОВА<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
А.И. МУНИЦЫН<sup>2</sup>, д.т.н., профессор  
АЛШУАЙЛИ АЛИ<sup>2</sup>, магистрант

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: krainova\_larisa@mail.ru*

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет  
"Московский энергетический институт"  
111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

### Динамический расчет лопаток паровой турбины

**Аннотация.** Разработана модель лопатки паровой турбины для численного расчета динамических характеристик, достоверность проведенных расчетов подтверждена результатами экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** собственные частоты, свободные колебания, лопатка паровой турбины.

L.N. KRAYNOVA<sup>1</sup>, candidate of science, Associate Professor;  
A.I. MUNITSYN<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, professor;  
ALSHUAILY ALY<sup>2</sup>, undergraduate

<sup>1</sup>Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: krainova\_larisa@mail.ru*

<sup>2</sup>Moscow Power Engineering Institute (National Research University)  
111116 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

### Dynamic computation of steam turbine blades

**Abstract.** Was developed the model of steam turbine blades for the numerical estimation of dynamic characteristics, the veracity of the cocmputation is confirmed by the results of experimental research.

**Key words:** proper frequencies, free vibration, steam turbine blade

Паротурбинные энергетические установки являются основой современной энергетики. Одним из основных элементов конструкции турбины является лопаточный аппарат. Рабочие лопатки последних ступеней ЦНД работают в условиях предельных нагрузок.

Помимо высоких статических нагрузок, лопатки испытывают большие динамические напряжения, которые особенно опасны в случае возникновения резонанса. Вибрационная отстройка лопаток является условием их надежной работы.

Традиционно расчет лопаток ведется с использованием методов, основанных на соотношениях теории стержней, в которых применяются упрощенные модели рабочих лопаток и вводятся различного рода допущения в расчетные схемы, приводящие к дополнительным погрешностям вычислений [1,2]. Традиционные методы не позволяют определить с необходимой точностью частотные характеристики на этапе проектирования. На практике вибрационная отстройка сопряжена с большими трудностями и осуществляется в основном экспериментально.

Поэтому внедрение новых, более точных расчетных методов в процесс проектирования рабочих лопаток, является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является сравнение динамических характеристик рабочей лопатки паровой турбины, полученных на основе метода конечных элементов и экспериментальных результатов, отражающих закономерности движения лопатки при ее колебаниях.

Численные исследования выполнены с помощью программного комплекса Mechanical APDL (ANSYS). Геометрические размеры и форма модели лопатки соответствуют размерам и форме лопатки паровой турбины, которая имеет большую длину, сложный профиль переменного сечения и большой угол предварительной закрутки (рис. 1). В результате расчета получены значения собственных частот и формы колебаний.

Достоверность проведенных расчетов подтверждена результатами экспериментальных исследований по определению частотных характеристик лопатки. Для физического моделирования задачи разработан испытательный стенд. Экспериментальные исследования вынужденных колебаний рабочей лопатки паровой турбины с жестким закреплением производились с помощью аппаратуры для измерения, регистрации и анализа параметров вибрационных процессов. Возбуждение колебаний производилось электромагнитным возбудителем, регистрация колебаний - датчиками виброускорений, закрепленными в нескольких точках исследуемой лопатки. В ходе испытаний получены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики колебаний лопатки. Экспериментальная АЧХ в диапазоне частот 10-500 Гц представлена на рис.2.

Данные эксперимента качественно подтверждают теоретические расчеты. Главные 1-я, 2-я формы невращающейся лопатки – изгибные, 3-я форма является крутильной. Формы 4-я и 5-я – преимущественно крутильные, следующие формы – изгибные с большой долей крутильных составляющих. Первые собственные частоты, определенные теоретически совпадают с частотами, полученными экспериментально.



Рис. 1. Геометрическая форма модели лопатки

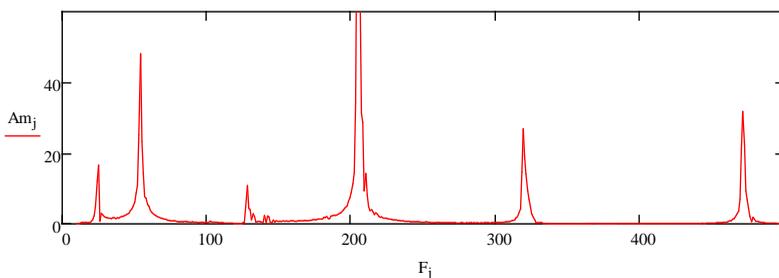


Рис. 2. Экспериментальная АЧХ

Таким образом, применение программного комплекса Mechanical APDL для расчета лопаток паровых турбин позволяет повысить точность проводимых расчетов и провести отстройку от резонанса на стадии проектирования.

#### Литература

1. **Костюк, А.Г.** Динамика и прочность турбомашин / А.Г. Костюк. – Изд. 3-е. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 476 с.
2. **Бидерман, В.Л.** Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.

## СЕКЦИЯ 13. «ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

УДК 621.3

А.А. ГОЛЯС, аспирант, Е. В. ШПЕНЬКОВА, студент  
В.А. ПОЛЕТАЕВ д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.  
Ленина 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

### **Смазочно-охлаждающие технологические средства для процессов поверхностного деформирования**

**Аннотация.** Одним из наиболее эффективных способов повышения эффективности поверхностного пластического деформирования металлов является применение смазочно-охлаждающих технологических средств, позволяющее повысить стойкость инструментов, точность и качество обрабатываемых поверхностей, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов.

**Ключевые слова:** шероховатость, смазочно-охлаждающее технологическое средство, состав, компоненты, поверхностный слой.

A.A. GOLYAS, a graduate student, EV Shpenkova, student  
V.A. POLETAYEV Professor,

Ivanovo State Power Engineering University  
34 Rabfakovskaya st., Ivanovo 153003, Russia.  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

### **Lubricating and cooling technological means for surface deformation processes**

**Abstract:** One of the most effective ways to increase the efficiency of the surface-plastic deformation of metals is at Menen-lubricating and cooling technological means allowing Sit rose-resistance tools, precision and surface quality-stey, especially when processing difficult materials.

**Key words:** surface roughness, cutting technological means, structure, components, surface layer.

Обработка алмазным выглаживанием является одним из наиболее простых и эффективных методов обработки деталей машин ППД. Алмазное выглаживание повышает усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость деталей и тем самым увеличивает долговечность машин и оборудования. В результате поверхностного деформирования изменяются микроструктура и физико-механические свойства верхнего слоя металла: повышается его твёрдость и прочность, возникают благоприятные сжимающие оста-

точные напряжения. Шероховатость поверхности становится ниже. Отделочно-упрочняющая обработка алмазным выглаживанием в настоящее время получает всё более широкое распространение в машиностроении и промышленности. Формирование поверхностного слоя при алмазном выглаживании происходит вследствие пластической деформации обрабатываемой поверхности. При пластической деформации поверхностный слой приобретает волокнистое специфическое строение (текстуру), исходная кристаллическая решетка искажается. Взаимодействие инструмента с обрабатываемой поверхностью при выглаживании заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользким по ней инструментом – выглаживателем [1]. При этом неровности поверхности, оставшиеся от предшествующей обработки, сглаживаются частично или полностью, поверхность приобретает зеркальный блеск, повышается твердость поверхностного слоя, в нем образуются сжимающие остаточные напряжения, изменяется микроструктура, и создается направленная текстура. После выглаживания поверхность остается чистой, не шаржированной осколками абразивных зерен, что обычно происходит при процессах абразивной обработки. Такое сочетание свойств выглаженной поверхности предопределяет ее высокие эксплуатационные износостойкость, сопротивление усталости и т.д.

Большое разнообразие механических и физико-химических свойств металлов и сплавов позволяет говорить о том, что наиболее эффективными являются специальные СОТС. Однако условия современного машиностроительного производства не всегда позволяют применять такие СОТС.

Для повышения эффективности пластического деформирования в настоящее время применяют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ): водные эмульсии из 5 эмульсолов или растворы неорганических электролитов и поверхностно-активных веществ. Примерами таких продуктов могут служить эмульсолы Э, ЭГТ, НГЛ-205, Укринол-1, ЭМУС и др., состоящие из нафтенных, смоляных (канифольных), жирных сульфокислот (например, от очистки нефтяных дистиллятов) в виде солей с едким натрием (калием), минерального масла и стабилизатора - спирта и воды [2]. В частности, эмульсолы Э (Э-1, Э-10 2, Э-3) содержат нафтенные кислоты масляного асидола – 7–12%, едкий натрий – 0.7–1.3%, этиловый спирт или этиленгликоль – 1.5–2.0%, воду – 4–6%, минеральное масло - до 100%. Аналогично ЭМУС: минеральное масло с добавками нефтяных сульфатов и противоизносных присадок. Далее на месте применения такие концентраты разбавляют водой (обычно в соотношении от 1:50 до 1:10) с образованием эмульсий молочного цвета, используемых для смазки и охлаждения режущего (штампового) инструмента и обрабатываемых изделий [3].

Такие СОЖ обладают рядом преимуществ: более высокой охла-

ждающей способностью, пожаробезопасностью, лучшими санитарно-гигиеническими характеристиками, сравнительно невысокой стоимостью рабочих растворов.

Недостатками такого состава смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) являются наличие неудовлетворительных смазочных свойств и трудность вопросов регенерации и утилизации отработанных растворов. Кроме того, имеется необходимость осуществления подачи СОЖ поливом в зону контакта инструмента и детали, что значительно повышает расход СОЖ при постоянной ее подаче в зону обработки и снижает работоспособность и эффективность использования самого раствора СОЖ.

Для устранения этих недостатков желательное применение пластичных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), которые представляют собой пластичные смазки. В зависимости от вида загустителя такие СОТС делятся на следующие классы: смазки на углеводородных загустителях (церезин, петролатум, парафин, воск и некоторые полимеры), смазки на мыльных загустителях (натриевые, литиевые, кальциевые, бариевые, алюминийевые, свинцовые и др.), смазки на неорганических загустителях (силикагель, глина, дисульфид молибдена, слюда, асбест, мел и др.). Особое место занимают пластичные смазки, где в качестве загустителей применяются стеклообразующие компоненты. Пасты содержат поверхностно-активные вещества, противоизносные и противозадирные присадки и др. Пластичные СОТС применяются однократно, но ввиду малого расхода, на многих технологических операциях, их применение экономически оправдано. Пасты применяются также на оборудовании, где отсутствует система охлаждения, когда применение жидких СОТС по санитарно-гигиеническим условиям невозможно. Пластичные смазочные материалы используют в мелкосерийном производстве, на операциях с низкими скоростями резания (резьбонарезании, развертывании, при выполнении ручных слесарных операций). По своим свойствам пластичные смазки занимают промежуточное положение между твердыми смазочными материалами и маслами. Методы нанесения пластичных смазок различны: погружением инструмента в смазочный материал, нанесением вручную кистью или лопаточкой, подвод к зоне резания при помощи шприца.

Для повышения качества обработки деталей поверхностным деформированием разработаны и созданы СОТС с новыми составами, на которые поданы заявки на патенты.

#### Литература

1. Голяс А.А., Полетаев В.А. Совершенствование процессов механической обработки в энергетическом машиностроении за счет внедрения процесса алмазного выглаживания / А.А. Голяс, В.А. Полетаев // Электромеханотроника и управление "Энергия-2016": одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 5-7 апреля

2016 года: материалы конференции. – Иваново: УИУНЛ ИГЭУ. – 2016. – Т.4. – С.122 – 124

**2. Поверхностные** явления и поверхностно-активные вещества (справочник), под ред. А.А. Абрамзона и Е.Д.Щукина, Л., «Химия», 1984.

**3. Патент** №2229235. Концентрат смазочно - охлаждающей жидкости для механической обработки металлов / В.А. Серов // Бюл. 14 от 20.05.2007. - 5 с.

УДК 544.653.22

Н.Г. ДЕМЬЯНЦЕВА<sup>1</sup> к.т.н., доцент,  
С.М.КУЗЬМИН<sup>2</sup> к.х.н., доцент,  
А.В. БАЛМАСОВ<sup>3</sup> д.т.н., профессор,

<sup>1-2</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени  
В.И. Ленина 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: demyantseva@bk.ru, smk@isc-ras.ru*

<sup>3</sup>Ивановский государственный химико-технологический  
университет, пр. Шереметевский, 7, г. Иваново, 153000, Россия  
*E-mail: balmasov@isuct.ru*

### **Влияние амплитуды импульсов напряжения на локализацию анодного растворения металлов**

**Аннотация.** В данной работе показано влияние амплитуды импульсов на локализацию процесса электрохимического растворения при анодной обработке материалов с использованием униполярных прямоугольных и синусоидальных импульсов напряжения.

**Ключевые слова:** локализация электрохимической размерной обработки, импульсные режимы

DEMYANTSEVA<sup>1</sup>, N.G., Ph.D. (techn.), Docent, Assoc. Professor,  
KUZ'MIN<sup>2</sup>, S.M., Ph.D. (chem.), Docent, Assoc. Professor,  
BALMASOV<sup>3</sup>, A.V., D.Sc. (techn.), Professor, Professor.

<sup>1-2</sup>V.I. Lenin Ivanovo State Power University  
34 Rabfakovskaya st., Ivanovo 153003, Russia.

*E-mail: demyantseva@bk.ru, smk@isc-ras.ru*

<sup>3</sup>Ivanovo State University of Chemistry and Technology  
7 Sheremetyevsky pr., Ivanovo 153000, Russia

*E-mail: balmasov@isuct.ru*

### **An influence of voltage pulses amplitude on localization of anodic dissolution of metals**

**Abstract.** An influence of amplitude of unipolar square and sinusoidal pulses on localization of anodic dissolution sites during electrochemical machining is shown.

**Key words:** localization of electrochemical machining, pulsed electrical modes.

Одна из ключевых задач совершенствования метода электрохимической размерной обработки металлов – повышение точности копирования формы электрода-инструмента может быть решена применением импульсных режимов [1-3]. Объяснение экстремальной зависимости возможно на основании рассмотрения особенностей движения заряженных частиц в нестационарных неоднородных полях [2, 4]. В данной работе показано, что варьирование амплитуды импульсов оказывает существенное влияние на локализацию процесса электрохимического растворения. На рис. 1 представлена зависимость величины коэффициента формы, полученная при обработке никеля с использованием униполярных прямоугольных импульсов частотой 2 кГц в 1 М растворе  $\text{NaNO}_3$ . Точность формообразования достигает максимума при амплитудах импульсного напряжения 10-15 В.

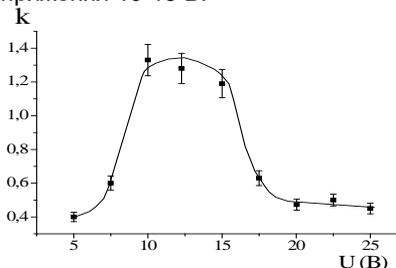


Рис. 1 Зависимость коэффициента формы от напряжения на ячейке при обработке никеля с использованием униполярных прямоугольных импульсов частотой 2 кГц

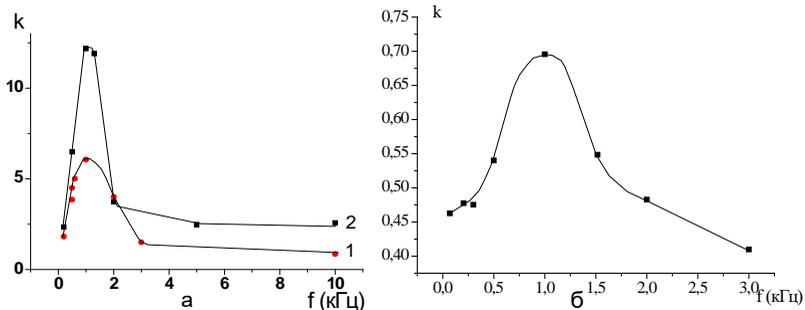


Рис. 2. Влияние частоты следования униполярных прямоугольных импульсов напряжения амплитудой 10 В на коэффициент формы при обработке: а) 1 – никеля Н1; 2 – стали 08КП. б) – меди М1

Оптимизация процесса формообразования предполагала соответствующий подбор частоты и амплитуды следования импульсов и скорости подачи электрода-инструмента (рис. 2–3). При амплитуде напряжения 10 В максимум функции  $k$  лежит в области 1 кГц и не зависит от

материала (никель, сталь, медь; рис. 2). Увеличение амплитуды импульсов напряжения до 14В сдвигает положение максимума коэффициента формы в область 3кГц, увеличение амплитуды до 26В – в область 6–8 кГц (рис. 3). При увеличении амплитуды импульсов напряжения максимум зависимости коэффициента локализации от частоты смещается в область больших частот. Одинаковый характер частотных зависимостей для различных материалов подтверждает одинаковый механизм влияния частоты следования импульсов на коэффициент формы. При электрохимической размерной обработке металлов на обрабатываемой детали существует поверхностное распределение межфазного скачка потенциала. На обрабатываемой детали формируются зоны пассивации поверхности и зона транспассивного растворения металла.

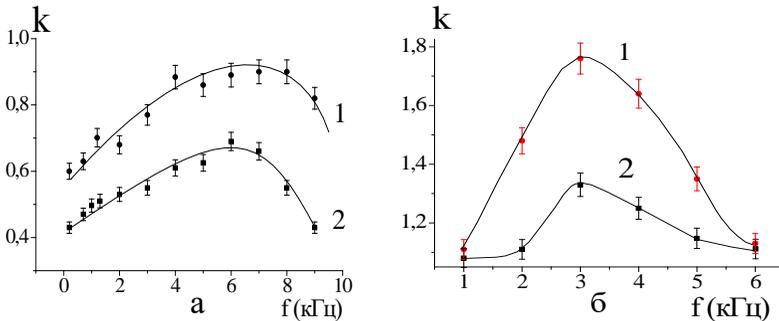


Рис. 3. Влияние частоты следования и амплитуды импульсов напряжения на величину коэффициента формы при электрохимической размерной обработке никеля Н1. Параметры ЭХО: скорости электрода-инструмента 0,29 мм/мин (1) и 0,25 мм/мин (2) при амплитуде униполярных полусинусоидальных импульсов 26 В (а) и 14 В (б)

Увеличение амплитуды импульса при неизменной частоте следования увеличивает зону транспассивного растворения металла, что, в свою очередь, приводит к уменьшению параметра  $k$ . С другой стороны, значение межфазного скачка потенциала в некоторой точке обрабатываемой детали обусловлено движением ионов в растворе. Следовательно, величина скачка потенциала достигает значения, необходимого для транспассивного растворения металла, спустя некоторое время после подачи импульса напряжения. При этом часть проходящего за время импульса электричества расходуется на заряд емкости двойного электрического слоя. Ограничивая длительность импульса при высоких амплитудах импульсов напряжения, мы можем уменьшить зону транспассивного растворения и увеличить точность электрохимической обработки. С этим, вероятно, связано смещение частоты максимума

коэффициента локализации при увеличении амплитуды импульсов напряжения в нашем эксперименте.

#### Литература

1. **Демьянцева Н.Г.** Влияние параметров импульсной поляризации на формообразование никеля / Н.Г. Демьянцева, С.М. Кузьмин, М.А. Солунин, А.М. Солунин, С.А. Лилин. – Журнал прикладной химии. – 2010. –Т. 83. Вып. 2. С. 249–254.
2. **Demyantseva N. G.** Evaluation of Shaping Accuracy upon Electrochemical Machining of Metals / N.G. Demyantseva, S.M. Kuzmin, A.V. Balmasov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2012. – Vol. 48.– № 3. – pp. 230–233.
3. **Kuzmin, S.M.** Influence of Pulse Recurrence Frequency on the Accuracy of Electrochemical Machining of Nickel, Copper, and Steel / S.M. Kuzmin, N.G. Demyantseva, A.V. Balmasov. – Surface Engineering and Applied Electrochemistry – 2016. – Vol. 52. – № 5. – pp. 411–414.
4. **Демьянцева Н.Г.** О движении заряженных частиц в переменном неоднородном электрическом поле / Н.Г. Демьянцева, С.М. Кузьмин, М.А. Солунин, С.А. Солунин, А.М. Солунин. – Журнал технической физики. – 2012. – Т.82., Вып. 11, – С. 1-10.

УДК 620.1

И.И. ВЕДЕРНИКОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: vedernikova@tam.ispu.ru*

### Определение свойств деталей, упрочненных лазерным модифицированием

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ характеристик материала рабочих поверхностей деталей из алюминиевых сплавов при упрочнении лазерным модифицированием.

**Ключевые слова:** лазерное упрочнение, микротвердость, алюминиевые сплавы, коррозионная стойкость, лазерное модифицирование, анодирование.

I. I. VEDERNIKOVA, associate Professor, PhD

Ivanovo State Power University  
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34  
*E-mail: vedernikova@tam.ispu.ru*

### Determination of the properties of the parts hardened by a laser modification

**Abstract.** A comparative analysis of the characteristics of the material of the working surfaces of parts from aluminium alloys for hardening by laser modification.

**Key words:** laser hardening, micro-hardness, aluminum alloys, corrosion resistance, laser modification, anodizing.

В некоторых деталях машин материалом для их изготовления служат алюминиевые сплавы как легкий материал, обладающий малой инерционностью. Однако следует отметить, что сплавы алюминия не обладают в достаточной степени прочностью, твердостью и стойкостью по отношению к поверхностно-активным веществам, применяемым в различных отраслях промышленности, при этом применение других материалов без изменения динамических характеристик невозможно. Поэтому свойства рабочих поверхностей деталей необходимо менять. Предлагается комбинированный метод упрочнения рабочей поверхности детали из сплава Д16, представляющий собой лазерное модифицирование анодированной поверхности.

Термическое упрочнение лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и охлаждении этого участка со сверхкритической скоростью после прекращения воздействия за счет теплоотвода во внутренние слои металла. В результате специфических тепловых процессов на поверхности обрабатываемых деталей возникает мелкодисперсная приповерхностная структура.

Лазерную обработку образцов осуществляли импульсным излучением неодимового лазера на стекле ГОС-301 в режиме свободной генерации импульса при различной энергии накачки и степени расфокусировки  $\Delta F$ , которая влияет на плотность энергии, рассеиваемой по поверхности. При воздействии лазерного излучения интенсивностью ниже  $30 \text{ кВт/см}^2$  видимых изменений на поверхности не наблюдается. Внешние изменения начинаются при  $q$  свыше  $30 \text{ кВт/см}^2$ , поверхность становится матовой и плохо рассеивает свет. На некоторых участках поверхности темный цвет покрытия изменяется на белый, плотность и толщина покрытия уменьшаются. Это свидетельствует о начале термодеструкции покрытия. При  $q$  свыше  $100 \text{ кВт/см}^2$  на поверхности образуется зона оплавления. Она имеет форму эллипсовидного кратера размерами 3–5 мм с углублением по середине и натеками расплавленного металла по краям. Явно видны закалочные трещины.

Наличие зоны с повышенными механическими свойствами покрытия показало, что при обработке поверхности лазерным излучением требуемой интенсивности можно достичь упрочнения оксидного покрытия. Оптимальным режимом упрочняющей лазерной обработки является  $10\text{--}15 \text{ кВт/см}^2$ . При этом максимальное увеличение микротвердости достигает 700 HV (рис. 1).

Поверхность анодной пленки пористая, что снижает её износостойкость при работе в паре трения. При воздействии лазером происходит передача теплоты в глубину металла. В результате алюминий, выплавляясь, поднимается вверх по капиллярам и заливает их, что приводит к получению беспористой, прочной и износостойкой рабочей поверхности детали. Была проведена проверка коррозионной стойкости различных покрытий. Проверялась модель износа в присутствии электролита. Скорость коррозии определяется двумя основными показателями

коррозионной стойкости металлов: глубинный показатель коррозии  $K_n$  – глубина коррозионного разрушения  $\Pi$  в единицу времени  $\tau$   $K_n = \Pi/\tau$  (мм/год); показатель изменения массы – изменение массы образца металла в результате коррозии, отнесенное к единице поверхности металла  $n$  к единице времени:

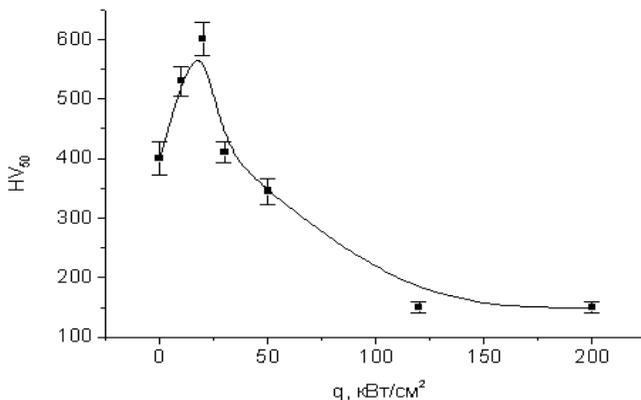


Рис. 1. Влияние интенсивности импульса на микротвердость поверхности зоны лазерного воздействия алюминиевого сплава Д16 с оксидным покрытием

$$K_m = \Delta m / S \cdot \tau \text{ (л/м}^2 \cdot \text{час)} \quad (1)$$

Скорость коррозии определялась объемным методом, т.е. по объему выделившегося водорода, в конечном итоге определяется группа и балл коррозионной стойкости. В качестве агрессивных сред выступали 5 % раствор КОН и 6 % раствор серной кислоты  $H_2SO_4$ .

Для исследования использовались 4 образца: 1 – образец неанодированного алюминия; 2 – образец алюминия, анодированного в растворе серной кислоты с добавлением щавелевой кислоты  $H_2SO_4 + H_2C_2O_4$ , упрочненный лазерным модифицированием; 3 – образец, анодированный в растворе серной кислоты  $H_2SO_4$ ; 4 – образец нержавеющей легированной стали X18H9T.

Взвесив и измерив, площадь поверхности образцов, помещали их в пробирки с агрессивной средой (5 % КОН и 6 %  $H_2SO_4$ ) и засекали время. Через каждые 15 минут снимали показания. По окончании опыта образцы вновь взвешивались. По объему выделившегося водорода с помощью формулы определили изменение массы образцов.

$$\Delta m = \frac{A \cdot V_0}{n \cdot 11,2 \cdot 1000}, \quad (2)$$

где  $A$  – атомный вес металла;  $V_0$  – объем выделившегося водорода (мл);  $n$  – валентность металла.

Затем определили показатель изменения массы  $K_m$  и глубинный показатель коррозии  $K_n$  соответственно по формулам:

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} \quad (\text{г/м}^2 \cdot \text{час}), \quad (3)$$

где  $S$  – площадь поверхности образца ( $\text{м}^2$ ),  $\tau$  – время испытаний (час).

$$K_n = \frac{K_m \cdot 8,76}{\gamma_{\text{me}}} \quad (\text{мм/год}), \quad (4)$$

где  $\gamma_{\text{me}}$  – плотность материала ( $\text{г/см}^3$ ).

Исследования показали, что в щелочной среде коррозионная стойкость анодированного алюминия по сравнению с неанодированным не хуже, а в кислой среде даже лучше, что можно объяснить взаимодействием химического состава анодной пленки со средой. Разрыхление получаемых покрытий не наблюдалось.

УДК 621.7.06

Л.К. ЧЕРНОВ, инженер,  
В.А. ПОЛЕТАЕВ д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.  
Ленина 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

### **Исследование износа галтовочных игл при магнитной галтовке**

**Аннотация.** Исследован и установлен характер износа галтовочных игл при магнитной галтовке. Построены двухмерная и трехмерная модели рабочего конца галтовочной иглы.

**Ключевые слова:** шероховатость, магнитная галтовка, магнитное поле, галтовочный наполнитель.

L.K. CHERNOV, engineer,  
V.A. POLETAEV Doctor of Technical Sciences, Professor  
Ivanovo State Power University  
34 Rabfakovskaya st., Ivanovo 153003, Russia.  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru,*

### **Investigation of wear of tumbling needles during magnetic tumbling**

**Abstract.** The character of wear of tumbling needles during magnetic tumbling has been investigated and established. Two-dimensional and three-dimensional models of the working end of a tumbling needle are constructed.

**Key words:** roughness, magnetic tumbling, magnetic field, tumbling filler.

Магнитная галтовка – вид суперфинишной обработки резанием. Режущим инструментом является ферромагнитный галтовочный наполнитель, средством передачи усилия с вала двигателя на обрабатываемую поверхность является магнитное поле, индуцируемое постоянными магнитами. Обработка происходит в неподвижном рабочем объеме, в который загружены: наполнитель, представляющий из себя короткие обоюдоострые иглы, обрабатываемые детали и смазочно-охлаждающая жидкость. Полирование деталей происходит за счет соударения перемещаемого магнитным полем наполнителя и обрабатываемых деталей. Магнитное поле в качестве средства передачи обрабатывающего усилия позволяет управлять потоком наполнителя, так как он движется в соответствии с конфигурацией магнитного поля, индуцируемого постоянными магнитами.

Галтовочная игла в результате контакта с поверхностью детали подвергается износу. Необходимо исследовать, как влияет степень износа игл на качество обрабатываемой поверхности.

На рис. 1 показан график изменения массы иглы от времени обработки детали из латуни марки Л63 в течение 4 часов.

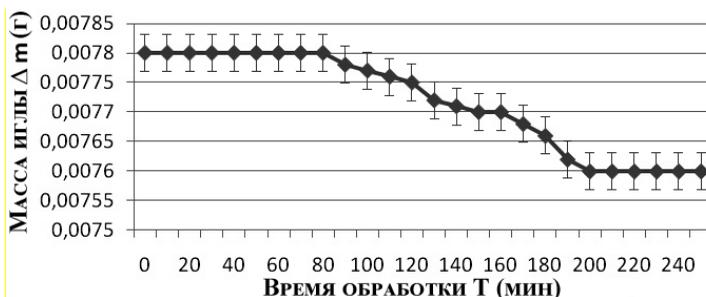


Рис. 1. Изменение массы галтовочной иглы от времени обработки детали из латуни марки Л63

Как видно из рис.1, масса иглы изменяется в зависимости от времени обработки детали, причем основное изменение массы происходит в период с 80 минуты по 200 минуту. В начале и в конце обработки масса иглы существенно не изменяется, следовательно, можно предположить, что игла интенсивно изнашивается только в определенный период времени. Повторные эксперименты подтвердили данное предположение.

Игла представляет собой цилиндр с высотой на порядок большей диаметра основания. Активной рабочей областью являются основания цилиндра и, следовательно, они должны подвергаться наибольшему износу.

На рис. 2 представлены Фотографии галтовочных игл: а) – до обработки; б) – после обработки детали в течение 2 часов; в) – после обработки детали в течение 3 часов (увеличение  $\times 10$ )

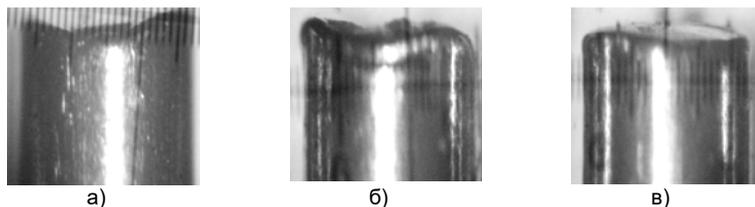


Рис. 2. Фотографии галтовочных игл:

а) – до обработки; б) – после обработки детали в течение 2 часов;  
в) – после обработки детали в течение 3 часов (увеличение  $\times 10$ )

На основе анализа полученных снимков галтовочных игл разработаны трехмерные модели новой иглы и иглы после износа.

Выбирались пять образцов галтовочных игл для каждого случая. В двумерном графическом редакторе (Adobe Photoshop) на основе фотографии иглы создавался контур рабочего конца галтовочной иглы (рис. 3).

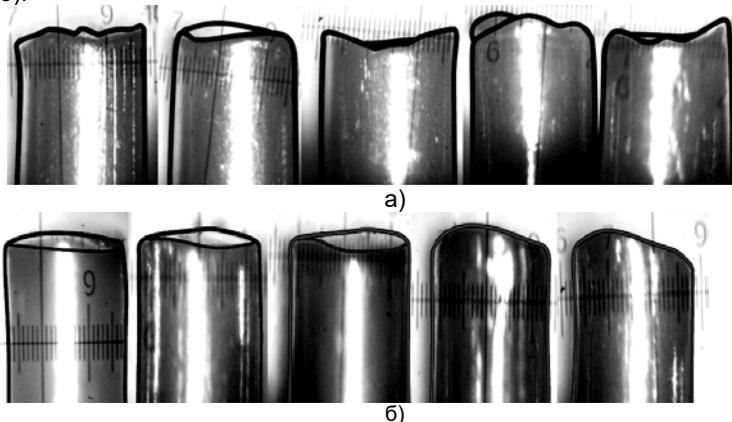


Рис. 3. Контурированные галтовочные иглы:  
а – новые; б – после износа

Полученные контуры совмещались. По средним точкам совмещенных контуров рабочих концов галтовочных игл проводился обобщающий контур (рис. 4).

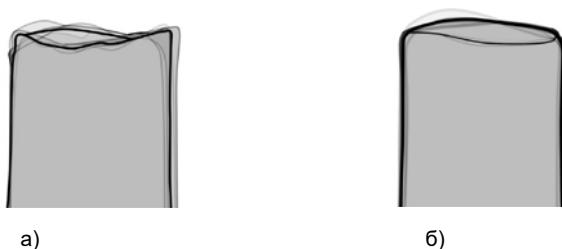


Рис. 4. Обобщающие контуры галтовочных игл: а) – для новых, б) – после износа

По полученному обобщающему контуру в графическом редакторе выстраивалась двухмерная модель рабочего конца галтовочной иглы (рис. 5).



Рис. 5. Двухмерная модель рабочего конца галтовочной иглы:  
а) – для новых, б) – после износа

Зная, что игла представляет собой тело вращения, а оба ее рабочих конца идентичны, на основе двухмерной в трехмерном редакторе 3d Max создается трехмерную модель (рис. 6).

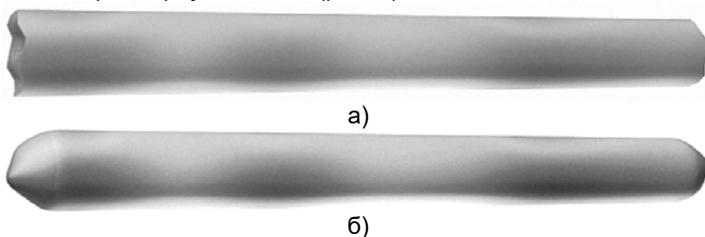


Рис. 6. Трехмерная модель галтовочной иглы:  
а) – для новых, б) – после износа

Из изменения геометрической формы иглы, можно сделать вывод, что основной износ происходит по краям оснований поверхности цилиндра. По мере изнашивания конец галтовочной иглы принимает форму, близкую к полусфере.

### Литература

1. **Чернов Л.К.**, Полетаев В.А. Magnetic dispositivo abrasivo per studi di tumbling magnetica./ Л.К. Чернов, В.А. Полетаев. Italian Science Review. – 2014. –№4. – С.461–465
2. **Чернов Л.К.**, Полетаев В.А. Магнитно-абразивное устройство для исследования процесса магнитной галтовки. Новый университет./ Л.К. Чернов, В.А. Полетаев. Серия "Технические науки". – Йошкар-Ола: ООО "Коллоквиум". – 2014.– №10. – С.12 – 17
3. **Чернов Л.К.**, Полетаев В.А. Совершенствование процесса магнитной галтовки в магнитно-абразивном устройстве. Материалы IV международной конференции "Фундаментальная наука и технологии - перспективные разработки" / Л.К. Чернов, В.А. Полетаев, 29-30 сентября 2014 г.: материалы конференции. – North Charlston: CreateSpace. – 2014.– Т.1. – С.139 – 141.

УДК 621.01

А.С. ОРЛОВ, к.т.н., доцент,  
Н.Л. ПАВЛЮКОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

## Упрочнение сверл из быстрорежущей стали импульсной магнитной обработкой

**Аннотация.** Представлены результаты упрочнения сверл из быстрорежущей стали путем импульсной магнитной обработки. Установлено, что импульсная магнитная обработка увеличивает износостойкость сверл в 1,3-1,7 раз.

**Ключевые слова:** упрочнение, магнитно-импульсное поле, сверла, быстрорежущая сталь, износостойкость.

A.S. ORLOV, Candidate of Engineering, associate professor,  
N.L. PAVLYUKOVA Candidate of Engineering, associate professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

## Rapid steel drills hardening by pulse magnetic treatment

**Abstract.** The results of rapid steel drills hardening by pulse magnetic treatment are presented. The experience has shown that pulse magnetic treatment increases drills' wearing qualities 1.3 to 1.7 times

**Key words:** hardening, pulse field, drills, rapid steel, wearing qualities.

Одной из важных задач при изготовлении режущего инструмента является увеличение его срока службы, то есть износостойкости. Поскольку режущий инструмент работает в коррозионной среде и с высокой нагрузкой, то он испытывает большой износ рабочей части. Импульсная магнитная обработка (МИО) является относительно новым и

перспективным методом обработки режущего инструмента. Результатом ее использования является уменьшение напряжений в структуре металла под действием импульсного магнитного поля, что приводит к увеличению срока службы инструмента в 1,5-2 раза.

При магнитном воздействии вещество изменяет свои физические и механические свойства. Улучшение свойств у ферромагнитных деталей, прошедших МИО, достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость материала.

Исследуемые образцы инструмента – сверла, изготовлены из быстрорежущей стали Р6М5. Имеющаяся структура материала характеризуется средней твердостью и износостойкостью. После обработки металла магнитно-импульсным полем, происходит уменьшение размеров субзерен с одновременным увеличением плотности дислокаций и величин микронапряжений. Причем эти изменения наиболее существенны для структуры троостита. Наибольшее увеличение остаточных напряжений происходит на границе мартенсит - троостит и в троостите. При этом под влиянием магнитного поля происходит перераспределение остаточных напряжений: увеличение сжимающих и уменьшение растягивающих. Кроме того, увеличивается глубина распределения сжимающих остаточных напряжений, а значит, увеличивается и глубина упрочненного слоя.

В процессе исследования для проведения экспериментов использована установка для импульсной магнитной обработки (рис. 1).

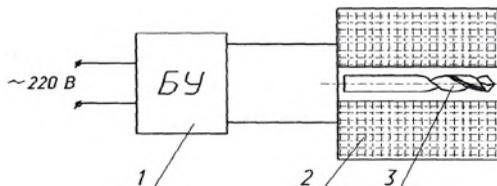


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:  
1 - блок управления; 2 - соленоид; 3 - обрабатываемый образец

Установка для МИО подключается к однофазной двухпроводной сети переменного тока с напряжением 220В. Блок управления формирует импульсы определенной амплитуды и частоты, которые подаются на обмотку соленоида. Амплитуда импульсов и частота их следования может изменяться с помощью регуляторов, находящихся на передней панели блока управления.

Образец (сверло) помещается в отверстие соленоида, так как здесь магнитное поле наиболее однородно и имеет максимальную напряженность. Магнитный поток, проходя через образец, вызывает в нем соответствующие структурные изменения. Напряженность магнитного поля

при упрочняющей обработке составляла 1000 кА/м. Количество импульсов на каждое сверло варьировалось от 1 до 9.

Испытаниям подвергались сверла из быстрорежущей стали марки Р6М5 диаметром 6 мм. Производилось сверление глухих отверстий глубиной 30 мм в стали с содержанием углерода 0,35 % на вертикально-сверлильном станке 2Н135 с автоматической подачей. Для охлаждения применялась СОЖ.

Сверла обрабатывались импульсным магнитным полем напряженностью 800 кА/м, с количеством импульсов от 1 до 9, длительностью импульса - 0,1 с, промежутком времени между импульсами - 1 с.

Режимы резания: частота вращения сверла 510 об/мин; подача - 0,1 мм; скорость резания - 9,6 м/мин. Сверлились отверстия глубиной 10 мм без выхода сверла из обрабатываемого материала.

В результате проведенных экспериментов выявлено, что при обработке стали 45 износ по задней поверхности сверла обработанного магнитно-импульсной обработкой с напряженностью поля  $H=500$  кА/м и с разным количеством импульсов находится в пределах 0,34–0,42 мм, а суммарная глубина сверления в пределах 800–1200 мм.

На рис. 2 показана зависимость величины фаски износа по задней поверхности кромок сверла диаметром 6 мм сверла из быстрорежущей стали Р6М5 от суммарной глубины сверления при обработке стали 45 сверлом упрочненным магнитноимпульсной обработкой (МИО) с напряженностью поля в соленоиде  $H = 500$  кА/м и с разным количеством импульсов.

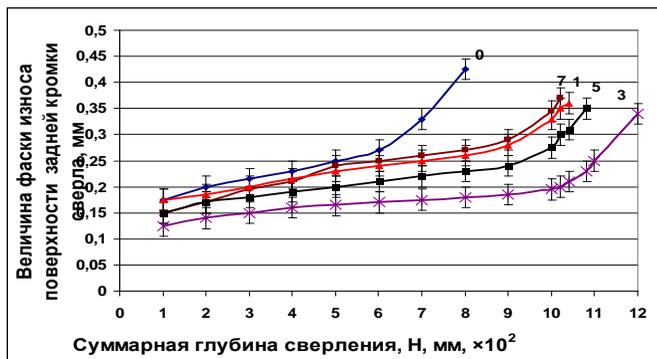


Рис. 2. Зависимость фаски износа по задней поверхности сверл диаметром 6 мм из быстрорежущей стали Р6М5 от суммарной глубины сверления при обработке стали 45 сверлом упрочненным магнитноимпульсной обработкой с напряженностью поля в соленоиде  $H = 500$  кА/м с разным количеством импульсов:

0 – без обработки МИО; 1 – с МИО и одним импульсом; 3 – с МИО и тремя импульсами; 5 – с МИО и пятью импульсами; 7 – с МИО и семью импульсами

Установлено, что импульсная магнитная обработка увеличивает износостойкость сверл в 1,3-1,7 раз. Причем наименьший износ по задней поверхности сверла происходит при количестве импульсов равным трем.

#### Литература

1. Орлов А.С., Полетаев В.А. Упрочнение сверл импульсной магнитной обработкой. ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2013. – 140с.

УДК 621.3

А.А. ГОЛЯС, аспирант, А.А. УТЮГОВА, студент,  
В.А. ПОЛЕТАЕВ д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.  
Ленина 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru,*

### Исследование толщины покрытия на изделиях

**Аннотация.** В данной работе описана конструкция и применение толщиномера PosiTector® 6000 для измерения толщины покрытия. Приведены результаты измерения с помощью данного прибора толщины лакокрасочного покрытия и величины деформированного слоя алмазным выглаживанием.

**Ключевые слова:** шероховатость, волнистость, покрытие, температура.

A.A. GOLYAS, a graduate student, A.A. UTUGOVA, student,  
V.A. POLETAYEV Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
34 Rabfakovskaya st., Ivanovo 153003, Russia.  
*E-mail: poletaev@tam.ispu.ru*

### Investigation of the coating thickness on the products

**Abstract.** This paper describes the design and application of the gauge PosiTector® 6000 to measure the thickness of the coating. The results of measurements using this device the thickness of the paint layer and the size of the deformed diamond burnishing.

**Keywords:** roughness, waviness, the coating temperature.

Толщиномер PosiTector® 6000 это прочный, полностью электронный прибор для измерения толщины покрытия. Использует принципы магнитной индукции и вихревых токов для точного и быстрого измерения покрытий на черных и цветных металлах.

Толщиномер готов к измерению без дополнительных калибровок для большинства применений и обладает следующими характеристи-

ками: мигающий индикатор - идеален в шумной обстановке цеха; функция быстрого восстановления заводских настроек; корпус прибора стоек к растворителям, кислотам, маслам, воде и пыли (всепогодный); преобразователь повышенной износостойкости; сертификат калибровки в соответствии с требованиями Американского института метрологии и измерений NIST; встроенная компенсация температуры обеспечивает точность измерений; функция увеличения разрешения для использования в приложениях, требующих большей точности; толщиномер соответствует национальным и международным стандартам, включая ISO и ASTM; электронный блок толщиномера универсален и можно подключать все датчики: толщиномер6000, толщиномер 200, SPG, DPM и UTG; высококонтрастный дисплей с подсветкой для работы в ярких или темных условиях; толщиномер постоянно отображает (обновляет среднее значение, стандартное отклонение, мин) максимальную толщину и число измерений; звуковое оповещение – громкий и четкий сигнал, когда ваши измерения превышают установленные пределы; быстрый режим - быстрая скорость измерения для экспресс-контроля; толщиномер оснащен USB-портом для быстрого и простого подключения к компьютеру и зарядки прибора, USB кабель в комплекте; использование PosiTector в качестве флэш-накопителя для просмотра и печати графиков, показаний. Может быть использован при помощи обычных веб-браузеров; сохранение даты и времени измерений; обновление программного обеспечения через интернет; подключение к ресурсу PosiSoft.net .

Сначала проводится измерение на детали без покрытия. Это позволит провести быструю проверку настройки нуля и определить, нужна ли калибровочная регулировка для измерения толщины покрытия. Затем необходимо прибор положить на поверхность без покрытия входящие в комплект меры толщин с известной толщиной, и провести с каждой из них отдельное измерение, чтобы убедиться, что прибор измеряет в пределах погрешности.

Для измерения покрытия с толщиной, близкой к требуемой, необходимо отрегулировать при помощи клавиш нижний предел. Затем выбирается следующий, чтобы подтвердить это значение. Теперь на дисплее отобразится текущая установка верхнего предела измерения. Аналогичным образом проводится регулировка этого предела. На дисплее появится иконка. Теперь измерения будут сравниваться с установленными пределами.

Если результаты находятся в этих пределах, дважды прозвучит сигнал и зеленый индикатор моргнет. Один сигнал низкого тона сообщит, что результат измерения ниже нижнего предела измерения, а сигнал высокого тона сообщит, что результат измерения выше верхнего предела. При выходе показаний за установленные пределы будет моргать красный индикатор.

*PosiTector 6000* автоматически компенсирует температуру. Прежде чем приступить к измерениям необходимо, чтобы температура прибора сравнялась с температурой окружающей среды в течение нескольких минут.

С помощью данного прибора были проведены измерения толщины лакокрасочного покрытия и величины деформированного слоя алмазным выглаживанием на деталях из цветных металлов и нержавеющей стали.

На рис. 1. показана фотография поверхности детали из стали 2Х18Н10Т после алмазного выглаживания (поперечное сечение), а на рис. 2 – с нанесённым слоем хрома и ультраалмаза [1-2].

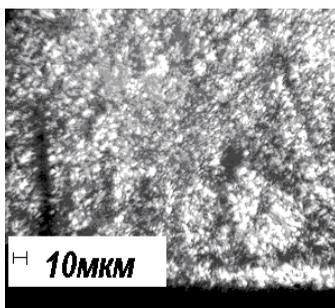


Рис. 1. Поверхность детали из стали 2Х18Н10Т после алмазного выглаживания

Проведенные с помощью данного прибора измерения толщины покрытия и величины деформированного слоя алмазным выглаживанием на деталях из нержавеющей стали дали такие же показания, что и на фотографиях в пределах погрешности.

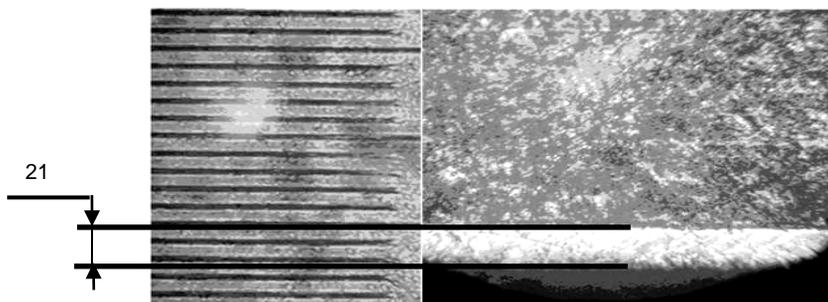


Рис. 2. Поверхность детали из стали 2Х18Н10Т с нанесённым слоем хрома и ультраалмаза

### Литература

1. **Полетаев В.А.**, Егорычева Е.В. Исследование характеристик поверхностного слоя деталей электронасосов // Наука и мир: журнал.— Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Научное обозрение". – 2014.– №10.–Т.1.– С.50–55
2. **Полетаев В.А.**, Пучков П.В. Повышение качества поверхностей трения деталей электронасосов. /Полетаев В.А., Пучков П.В. // «Заводская лаборатория. Диагностика материалов». – 2015, № 9. – С. 74 -76.

УДК 620.1

И.И. ВЕДЕРНИКОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: vedernikova@tam.ispu.ru*

### Исследование трибологических свойств деталей, упрочненных глубоким анодированием

**Аннотация.** Определен оптимальный режим глубокого анодирования деталей из алюминиевых сплавов.

**Ключевые слова:** упрочнение, толщина оксидной пленки, твердость оксидной пленки, алюминиевые сплавы, глубокое анодирование.

I. I. VEDERNIKOVA, associate Professor, PhD

Ivanovo State Power University  
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34  
*E-mail: vedernikova@tam.ispu.ru*

### Study of tribological properties of parts hardened by deep anodizing

**Abstract.** Optimal mode deep anodizing parts made of aluminum alloys.

**Keywords:** hardening, the thickness of the oxide film, the hardness of oak for seat protectors, aluminium alloy, deep anodized.

Анодирование, то есть процесс создания на поверхности металлов оксидных пленок для защитных и декоративных целей, распространено достаточно широко. Глубоким анодированием называют процесс получения оксидных пленок толщиной больше 40 мкм, отличающихся высокой твердостью, износостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами. С помощью таких пленок можно повысить износостойкость трущихся поверхностей деталей, например зубчатых передач, обеспечить термостойкую электроизоляцию. Глубокое анодирование тонкостенных деталей повышает жесткость конструкции. Глубокое анодирование часто отрицательно сказывается на механических свойствах

анодированных изделий: уменьшается предел выносливости, относительное удлинение и сужение поперечного сечения. Такое влияние незначительно при малой толщине пленки и возрастает с ее увеличением. После удаления оксидной пленки восстанавливаются первоначальные свойства (до анодирования).

Широко известно, что анодные пленки хорошо противостоят механическому и эрозионному износу, имеют прочную связь с основным металлом, обладают высокой коррозионной стойкостью и электроизоляционными свойствами. Вместе с тем совершенно недостаточно изучены трибологические характеристики анодной пленки на ее трибологические свойства, неизменная адсорбционная способность анодного покрытия.

На основании проведенного анализа исследований процессов глубокого анодирования, где в качестве основного критерия, при отсутствии данных об износостойкости, использовались толщина анодного покрытия и его твердость, а в качестве дополнительных критериев - стоимость процесса, его продолжительность и простота обслуживания, был выбран для дальнейших исследований процесс глубокого анодирования в серноокислом электролите, концентрацией  $15 \div 20$  % с постоянной плотностью тока  $2 \div 5$  а/дм<sup>2</sup>, при температуре раствора  $-4 \div +4$  °С.

Для исследований в ванну установки для анодирования помещались образцы размером  $50 \times 20 \times 0,5$ , изготовленные из дюралюминия Д16Т. При определении зависимостей толщины и твердости анодной пленки от времени анодирования одновременно помещались 8 образцов. Через каждые 30 мин два образца вынимались из ванны, а величина тока уменьшалась так, чтобы плотность его оставалась без изменений. На анодированных образцах делались поперечные микрошлифы. Толщина пленки измерялась на микрошлифах с помощью электронной микроскопии, а микротвердость - на твердомере ПМТ-3. Изучалось влияние времени анодирования на толщину покрытия и твердость пленки (рис. 1, 2).

В результате проведенных исследований было установлено, что толщина анодной пленки возрастает с увеличением времени анодирования. В начале процесса рост пленки интенсивнее, но через  $30 \div 60$  мин скорость роста замедляется, а через 120 мин толщина анодного покрытия стабилизируется, и дальнейшего его роста не наблюдается.

Это объясняется физической сущностью процесса анодирования: в то время как на внутренней поверхности анодного покрытия происходит нарастание пленки под действием анодного тока, на внешней поверхности покрытия под действием химической активности электролита происходит растравливание пленки. Процесс роста и процесс разрушения анодного покрытия при определенных параметрах анодирования через какое-то время уравниваются друг друга.

С возрастанием плотности анодного тока толщина покрытия увеличивается и становится максимальной при плотности  $4$  а/дм<sup>2</sup>. При даль-

нейшем увеличении плотности тока толщина покрытия растет медленнее.

Толщина пленки, мкм

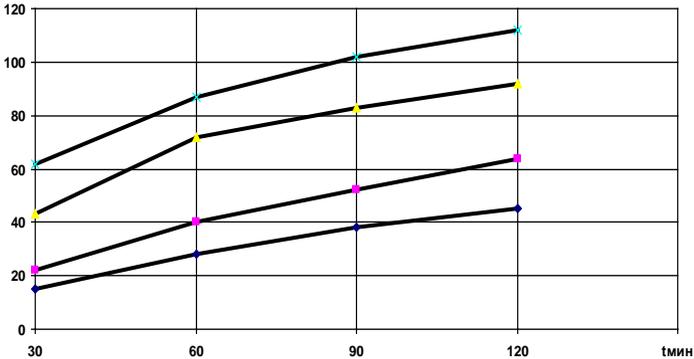


Рис. 1. Зависимость толщины анодной пленки от времени анодирования:  
● - 2 а/дм<sup>2</sup>; ○ - 3 а/дм<sup>2</sup>; △ - 4 а/дм<sup>2</sup>; □ - 5 а/дм<sup>2</sup>

Твердость пленки

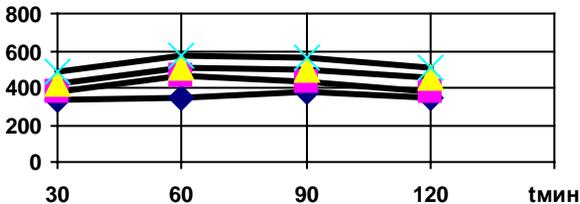


Рис. 2. Зависимость твердости анодной пленки от времени анодирования:  
● - 2 а/дм<sup>2</sup>; ○ - 3 а/дм<sup>2</sup>; △ - 4 а/дм<sup>2</sup>; □ - 5 а/дм<sup>2</sup>

Твердость анодного покрытия наоборот увеличивается при уменьшении плотности анодного тока. С точки зрения физической сущности процесса это объясняется тем, что по условию формирования пленки с внутренней стороны под действием химической активности электролита и анодного тока в массе покрытия возникают микроканалы – поры, тем больше, чем выше плотность анодного тока.

С увеличением времени анодирования твердость покрытия сначала возрастает, а после 60 ÷ 90 мин снижается.

Таким образом, для повышения износостойкости деталей из алюминиевых сплавов применяем глубокое анодирование в сернокислом электролите с постоянной плотностью тока 4 а/дм<sup>2</sup>. Время анодирования 60 мин.

УДК 621.7.06

В.М. ВЛАСОВ, ассистент, Т. А. ПАХОЛКОВА, доцент  
В.А. ПОЛЕТАЕВ д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.  
Ленина 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

*E-mail:* <sup>1</sup>poletaev@tam.ispu.ru, <sup>2</sup>leshka.vlasov@gmail.com, <sup>3</sup>tanypah@mail.ru

## **Влияние моментов трения и температуры на параметры магнитожидкостных герметизаторов**

**Аннотация.** В данной работе описана экспериментальная установка для исследования температуры и моментов трения в рабочих зазорах магнитожидкостных герметизаторов в зависимости от величин шероховатости и волнистости поверхностей полюсов и втулок из разных материалов, контактирующих с магнитной жидкостью разного типа

**Ключевые слова:** шероховатость, волнистость, магнитное поле, ферромагнитная жидкость, температура.

V.M. VLASOV, assistant,  
T.A. PAHOLKOVA, Associate Professor  
V.A. POLETAYEV Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
34 Rabfakovskaya st., Ivanovo 153003, Russia.

*E-mail:* <sup>1</sup>poletaev@tam.ispu.ru, <sup>2</sup>leshka.vlasov@gmail.com, <sup>3</sup>tanypah@mail.ru

## **Influence of friction moment and temperature on the parameters of magnetic-sealers**

**Abstract.** This paper describes the experimental setup for the study of temperature and friction points in the gap magnetic-sealers, depending on the values of roughness and waviness in the pole surfaces and bushes of different materials in contact with the magnet-tion of different types of liquid.

**Keywords:** roughness, waviness, the magnetic field, the ferromagnetic fluid temperature.

Момент трения является одним из важнейших параметров магнито-жидкостных герметизаторов, оказывающий влияние на величины передаваемых моментов и мощности. На момент трения магнитожидкостных герметизаторов влияют вязкость используемой магнитной жидкости, напряженность магнитного поля, градиент скорости сдвига в рабочем зазоре устройства, величина рабочего зазора, включающая величины шероховатости поверхностей полюсов и втулки, контактирующих с магнитной жидкостью, а изнашивание контактирующих поверхностей здесь практически исключается.

В условиях жидкостной (гидродинамической) смазки между поверхностями трения взаимодействующих деталей возникает зазор, пре-

вышающий сумму максимальных высот микронеровностей и волн этих поверхностей. Подшипники скольжения со смазочной магнитной жидкостью и магнитожидкостные уплотнения [1-2], как правило, просты по конструкции (рис. 1.)

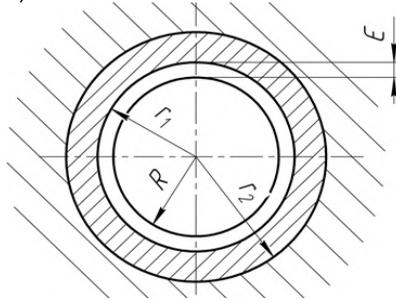


Рис. 1. Схема магнитожидкостного герметизатора при гидродинамической (жидкостной) смазке

Из-за различия в размерах вала и втулки между ними имеется радиальный зазор, заполненный ферромагнитной жидкостью:

$$\varepsilon = r_1 - R, \quad (1)$$

где  $r_1$  – внутренний радиус втулки;  $R$  – радиус вала.

Толщина слоя магнитной жидкости и зависит от угловой скорости и вязкости магнитной жидкости. Чем больше эти параметры, тем больше  $h$ . При установившемся режиме работы толщина  $h$  слоя магнитной жидкости должна быть больше суммы микронеровностей полюса  $R_{z1}$  и вала (втулки)  $R_{z2}$ , (рис. 2).

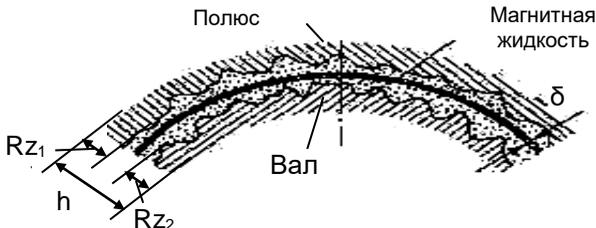


Рис. 2. Слой магнитной жидкости при установившемся режиме работы:  $\delta$  – радиальный зазор;  $h$  – толщина слоя магнитной жидкости;  $R_{z1}$  – величина микронеровностей полюса;  $R_{z2}$  – величина микронеровностей вала (втулки)

На рис. 3 показана разработанная модель рабочего зазора магнито-жидкостных герметизаторов, образованная поверхностями с разной величиной шероховатости [3].

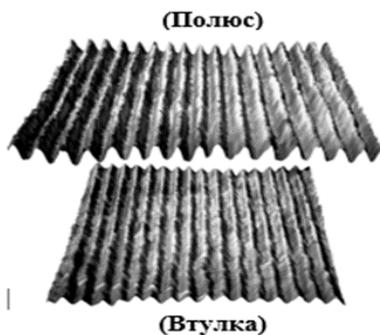


Рис. 3. Модель рабочего зазора, составленного из поверхностей втулки (сталь 40X13) с шероховатостью  $R_a=0,945$  мкм ( $R_z = 4,026$  мкм) и полюса (сталь 3) с шероховатостью  $R_a=0,808$  мкм ( $R_z = 3,875$  мкм)

Для определения влияния вязкости используемой магнитной жидкости, температуры, напряженности магнитного поля, частоты вращения вала, величин шероховатости  $R_a$  и волнистости поверхностей сменных втулок и полюсов на момент трения в рабочем зазоре магнитожидкостного герметизатора была модернизирована установка с радиальным магнитожидкостным уплотнением [4], представленная на рис. 4. отверстие 13 при помощи тепловизора 16.

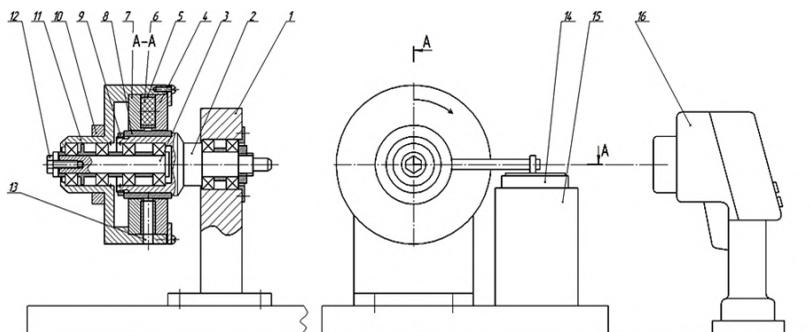


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – стойка; 2 – подвижный вал; 3 – неподвижный вал; 4 – съемный полюс; 5 – диск (обойма); 6 – магнит; 7 – съемный полюс; 8 – сменная втулка; 9 – гайка; 10 – хомут; 11 – корпус; 12 – болт; 13 – отверстие для измерения температуры; 14 – весы; 15 – стойка; 16 – тепловизор.

Магнитная жидкость размещается с равномерным рабочим зазором с однородным магнитным полем между сменными полюсами 4 и смен-

ной втулкой 9. Источником магнитного поля являются цилиндрические постоянные магниты 6, равномерно размещенные по окружности между полюсными приставками. Вал 2 приводится в движение электродвигателем с регулируемой скоростью вращения. Момент трения, создаваемый магнитной жидкостью и опорными подшипниками, передается на магнитную систему устройства и измеряется электронными весами 14. Температура на поверхности сменной втулки 8 измеряется через отверстие 13. Для проведения исследований используется тепловизор Testo 882 с размером матрицы 320x240 пикселей, температурной чувствительностью <60 мК при 30°C. Температурный диапазон - 20°C...+100°C. Погрешность измерения  $\pm 2\%$  от величины показания. При измерении температуры применялся коэффициент излучения 0,95.

Для исследования используются постоянные магниты типов:

- ИЖКГ из материалов ЮНДКТ5БА диаметром 10 мм с индукцией = 0,5 (Тл) и коэрцитивной силой = 120 (кА/м);
- ЕАЖИ из материала феррита стронция диаметром 15 мм с индукцией = 0,3 (Тл) и коэрцитивной силой = 158 (кА/м);
- ИЖКГ из материала феррит стронция диаметром 20 мм с индукцией = 0,3 (Тл) и коэрцитивной силой = 185 (кА/м).

Сменные втулки 8 (рис. 4.) изготовлены из стали 3 с разными величинами шероховатости наружной поверхности  $R_a$  (0,354 мкм; 1,220 мкм; 7,210 мкм) и из стали 40х13 при величине шероховатости  $R_a$  наружной поверхности  $R_a$  (0,362 мкм; 0,945 мкм; 8,028 мкм).

Экспериментальная установка позволяет проводить исследования изменения температуры и моментов трения в рабочих зазорах магнитоожидкостных герметизаторов в зависимости от величины шероховатости и волнистости поверхностей полюсов и втулок из разных материалов, контактирующих с магнитной жидкостью разного типа.

#### Литература

1. **Перминов С.М.**, Перминова А.С., Полетаев В.А. Патент № 22531070 РФ. Магнитоожидкостное уплотнение вала с пониженным моментом трения; опубл. 20.10.2014, Бюлл. №29. 2 с.
2. **Перминов С.М.**, Перминова А.С., Полетаев В.А Патент № 2536863 РФ. Способ повышения ресурса и надежности устройств с нанодисперсной магнитной жидкостью; опубл. 20.12.2014, Бюлл., №36.
3. **Власов А.М.**, Полетаев В.А., Пахолкова Т.А. Построение трехмерной модели шероховатой поверхности. А.М. Власов, В.А Полетаев, Т.А. Пахолкова // Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных трудов. Брянск: Брянская государственная инженерно-технологическая академия. 2014. №20. С.19–22.
4. **Полетаев В.А.**, Пахолкова Т.А., Власов А.М. Установка для исследования величины рабочего зазора на момент трения магнитоожидкостных устройств. В.А Полетаев, Т.А. Пахолкова, А.М. Власов // Трение и смазка в машинах и механизмах: Журнал. – Москва: ООО НТИ «Машиностроение». № 9. 2013 С. 29–31.

УДК 669.058

В.П. ЗАРУБИН, к.т.н., доцент, В.В. КИСЕЛЕВ, к.т.н., доцент,  
А.В. ТОПОРОВ, к.т.н., доцент,  
П.В. ПУЧКОВ, к.т.н., старший преподаватель,  
А.А. ПОКРОВСКИЙ, к.т.н., доцент,

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33,  
*E-mail: palpuch@mail.r*

### **Повышение долговечности двигателей пожарных автомобилей улучшением моторных масел**

**Аннотация.** В статье описана разработанная противоизносная присадка к моторным маслам, содержащая соли мягких металлов. Показаны триботехнические показатели разработанной смазки. Указана возможная область внедрения смазочной композиции.

**Ключевые слова:** Пожарная техника, безыносное трение, смазочная композиция

V.P. ZARUBIN, associate Professor, PhD,  
V.V. KISELEV, associate Professor, PhD,  
TOPOROV A.V. associate Professor, PhD,  
P.V. PUCHKOV, A.A.POKROVSKIY, associate Professor, PhD

IFRA of SFS of EMERCOM of Russia  
*E-mail: palpuch@mail.r*

### **Increase the longevity of the engines of fire trucks by improving engine oils**

**Abstract.** The article describes the developed antiwear additive for engine oils, salts containing soft metals. Recently developed tribological performance lubricant. Contains the possible area of implementation of the lubricant composition.

**Keywords:** Fire equipment, wearless friction, lubricating composition

Для снижения износа деталей пожарной техники требуется использование качественных смазочных материалов или улучшение имеющихся смазок введением в них различных добавок.

Применительно к пожарной технике проблема износа подвижных деталей двигателей достаточно актуальна, поскольку в данной сфере двигатели пожарных и аварийно-спасательных автомобилей кроме транспортного режима эксплуатируются еще и в стационарном режиме в качестве привода на исполнительный агрегат, кроме того, они работают и без нагрузки в режиме прогрева и при смене караула во время проведения ежедневного технического осмотра. Изнашивание деталей приводит к ухудшению технических характеристик механизмов, снижению скорости движения пожарных автомобилей, подачи и напора,

развиваемых пожарными насосами. Все это приводит к преждевременной постановке автомобилей на техническое обслуживание или ремонт.

Некоторые добавки способны приводить к созданию в зоне трения металлических пленок. Достижимое повышение износостойкости может быть объяснено осуществлением в зоне трения явления избирательного переноса. Авторами проводится активная работа по созданию противоизносных присадок, содержащих в своей основе соли мягких металлов. Ранее была разработана и испытана присадка «Смазочная композиция» [1] на основе солей меди и олова предельных жирных кислот. Присадка предназначена для индустриальных масел общего назначения и трансмиссионных масел. Действие указанной присадки описано в работах [2].

В данной работе приводим триботехнические показатели новой смазочной композиции на основе мягких металлов. Металлические компоненты находятся в смазке в ионном виде и способны проходить через системы фильтров. Смазочная композиция предназначена для качественного улучшения триботехнических показателей минеральных и полусинтетических масел и смазок любой вязкости, применяемых в технике любого назначения.

Для оценки и сравнения разработанных присадок были исследованы зависимость коэффициента трения от приложенной нагрузки, зависимость интенсивности изнашивания от пробега при фиксированной нагрузке и коррозионная активность разработанной смазочной композиции. Эти характеристики определяют границы работоспособности пары трения. Стойкость материалов к изнашиванию в различных средах и при различных режимах трения позволяют выявить ресурс и срок службы узлов трения.

Вводимая 3% концентрация разработанной присадки в моторные масла позволила качественно улучшить его основные триботехнические характеристики (рис. 1, рис. 2).

Можно заметить на представленном рис. 1, что модифицированное масло позволило значительно (до 2 раз) снизить коэффициент трения. Кроме этого в некоторой степени увеличился и показатель нагрузочной способности в контактирующей паре. Такие результаты были получены, благодаря образованию на поверхности трения химически чистых, постоянно возобновляемых слоев антифрикционных металлов, а именно меди, олова, никеля и кобальта.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что при модифицировании базового моторного масла М8В разработанной присадкой интенсивность изнашивания значительно снижается с увеличением пробега контактирующей пары, а именно до 5 раз.

Отмечаем и тот факт, что моторное масло, модифицированное разработанным стеаратом гораздо стабильнее работает во всем диапазоне изученных нами нагрузок и температур, что не наблюдается в моторном масле без присадки.

Поэтому разработанная присадка позволяет в достаточной мере избежать эффекта повышенного износа во время прогрева двигателя.

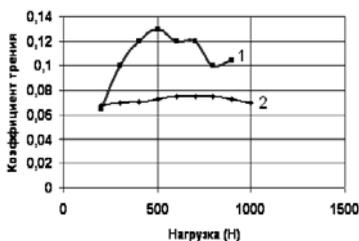


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от давления базового масла М8В и того же масла, модифицированного разработанной присадкой:  
1 – моторной масло М8В ГОСТ 10541-78 SAE 20W-20 API CB; 2 – моторное масло М8В с 3 % разработанной присадкой

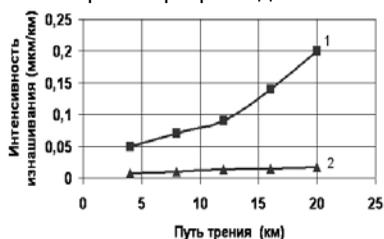


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания от пути трения при постоянном давлении 5 (МПа):  
1 – моторной масло М8В ГОСТ 10541-78 SAE 20W-20 API CB;  
2 – моторное масло М8В с 3 % разработанной присадкой

Разработанная присадка химически нейтральна ко всем видам минеральных и полусинтетических масел отечественного и импортного производства. Присадка полностью растворима маслами, не задерживается системами фильтров, не способствует коррозионным процессам.

Разработанная присадка может найти широкий круг применения. Выявленные в ходе экспериментов некоторые качественные показатели, значительно превосходят показатели других аналогичных присадок. Не последним достоинством присадки является простота в применении и относительная дешевизна в изготовлении.

### Литература

1. Киселев В.В., Мельников В.Г. Исследование свойств разработанных присадок на основе солей мягких металлов.// Эффект безызносности и триботехнологии. – 2004. – №1. – С. 16 – 20.
2. Киселев В.В. К проблеме улучшения триботехнических свойств смазочных материалов.// Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2006. – Т.49. – № 12. – С.113 -114.
3. Киселев В.В., Топоров А.В., Пучков П.В. Перспективы использования модернизированных смазочных материалов в пожарной и аварийно-спасательной технике.// Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2011. - №3. – С. 23–29.

УДК 621.165

А.А. ГОРБУНОВ, инженер, А.А. ЧУБАРОВ, инженер,  
А.Ю. РЯБЧИКОВ, д.т.н., профессор

Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
*E-mail: gorbunow.a1993@yandex.ru*

## **Модернизация поршня привода обратного клапана паровых турбин**

**Аннотация.** Разработано применение новых уплотнений поршня привода обратных клапанов паровых турбин.

**Ключевые слова:** паротурбинные установки, клапана обратные, уплотнение привода.

A.A. GORBUNOV, engineer, A.A. CHUBAROV, engineer,  
A.U. RYABCHIKOV, Doct. of Tech. Sci., professor

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
620002 Mira str. 19, Ekaterinburg, Russia  
*E-mail: gorbunow.a1993@yandex.ru*

## **Modernization of check valve drive piston for steam turbines**

**Abstract.** The application is designed of the new seals for piston of steam turbines check valves drive.

**Key words:** steam-turbine plants, check valves, drive seal.

Развитие теплоэнергетики связано с увеличением единичной мощности паротурбинных установок (ПТУ). Конструкция современных паровых турбин наряду с высокой экономичностью выработки электрической и тепловой энергии должна обеспечивать длительную и надежную работу оборудования. Это обуславливает повышенные требования к системам защиты ПТУ. Поэтому предохранительные и обратные клапаны – элементы системы защиты ПТУ – должны быть особо надежными и быстродействующими. Кроме того, указанная трубопроводная арматура должна удовлетворять специфическим условиям работы в составе ПТУ.

Назначение обратных клапанов, установленных на трубопроводах регулируемых и нерегулируемых отборов пара – предотвратить попадание пара в проточную часть турбины из трубопроводов и теплообменных аппаратов, в то же время обратный клапан не должен препятствовать движению пара из турбины в теплообменный аппарат при нормальной работе ПТУ. Чтобы увеличить быстродействие и гарантировать полное закрытие затвора при его зависании, обратные клапаны отборов снабжают устройством для принудительного закрытия затвора – приводом обратного клапана [1, 2].

Приводы представляют собой силовые механизмы толкающе-ударного действия. Конструкция и принцип действия приводов, применяемых на АО «Уральский турбинный завод», представлено на рис.1.

Приводы обратных клапанов состоят из следующих элементов: корпуса - позиция 3, в котором расположены силовая пружина - позиция 2, штока – позиция 5, в сборе с поршнем - позиция 4 с уплотнением поршня – позиция 1.

Привод поршня обратных клапанов уплотняют, как правило, резиновыми кольцами, имеющими ряд недостатков.

Основными недостатками в уплотнениях, изготовленных из резиновых колец, являются невысокая прочность на разрыв и достаточно высокий коэффициент трения. Малая прочность на разрыв в совокупности с малым диапазоном твердости и сохранением рабочих размеров в процессе эксплуатации не позволяет надежно уплотнить поршень относительно корпуса. Применение в уплотнениях колец, изготовленных из фторопласта, позволяет избежать этих недостатков. Пример приведен на рис. 2. Под позицией 3 и 4 обозначены корпус и поршень привода соответственно. Позиция 2 – уплотнительное кольцо, изготовленное из резины. Видно, что уплотнение поз.2 сильно деформируется по сравнению со своей первоначальной геометрической формой. Со временем из-за малой прочности на разрыв резиновое кольцо рвется и в процессе эксплуатации обратного клапана становится неэффективным по сравнению с уплотнением из фторопласта (поз. 1), которое имеет высокую абразивную стойкость и более широкий диапазон твердости.

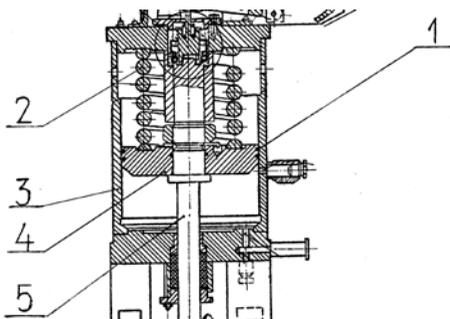


Рис. 1. Привод обратного клапана (обозначения см. в тексте)

Срок эксплуатации резиновых уплотнений поршня ограничивается 2-3 годами, применение уплотнений из фторопласта продлит межремонтный период привода обратного клапана.

Быстродействие обратного клапана – одна из важнейших его характеристик. Применение уплотнений из фторопласта позволит поршню

привода перемещаться относительно корпуса клапана быстрее, чем с уплотнением, выполненным из резиновых колец. К основным недостаткам уплотнений из резиновых колец относится высокий коэффициент трения. По опытным данным пара «сталь-резина» имеет коэффициент трения 0,5-0,6, в то же время для пары «сталь-фторопласт» — 0,05-0,1, что обеспечивает значительно меньший износ материала кольца. При сухом трении металлов по фторопласту и малой скорости скольжения коэффициент трения обычно не превышает коэффициентов трения в металлических подшипниках при наличии смазки.

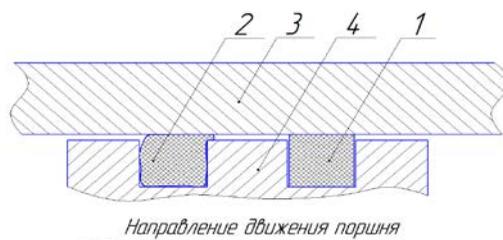


Рис. 2. Уплотнение поршня (обозначения см. в тексте)

Фторопласт имеет твердость выше, чем твердость резины, что дает возможность механически обрабатывать его. А это значит, что можно получить уплотнение из фторопласта практически любой формы и с любыми допусками, что позволит обеспечивать отсутствие заеданий, а так же герметичности корпуса привода.

Ещё одна технологическая необходимость, появляющаяся с применением резиновых уплотнений – хромирование корпуса привода, что увеличивает себестоимость обратного клапана. Хромирование применяется, помимо придания повышенной твердости и коррозионной стойкости, для придания гладкости стенок корпуса, что уменьшает коэффициент трения резиновых уплотнений. Применение фторопластовых уплотнений позволит уйти от технологической операции хромирования.

Экспериментальное исследование применения фторопластовых уплотнений поршня привода проводятся на АО «Уральский турбинный завод» в вертикальных клапанах КОС-250-100-III.

#### Литература

1. Сурис П.Л. Предохранительные и обратные клапаны паротурбинных установок/ П.Л. Сурис, М.: Энергоиздат, 1982, - 192 с.
2. АО «Уральский турбинный завод». Приводы ППС. Руководство по эксплуатации. 2014, - 3 с.

УДК 681.511.4

А.А. КИСЕЛЕВ, к.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34  
*E-mail: kaa\_alp@mail.ru*

## Конфигурационный пакет PhasimDA

**Аннотация.** Разработанный пакет программ PhasimDA позволяет конфигурировать, настраивать, диагностировать, исследовать и эффективно управлять электроприводами типа ЭПБФМ.

**Ключевые слова:** Электропривод, панель управления, конфигурационный пакет программ.

A.A. KISELEV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo  
34 Rabfakovskaya st., Ivanovo 153003, Russia.  
*E-mail: kaa\_alp@mail.ru*

## PhasimDA configuration package

**Abstract.** The PhasimDA configuration package showed full operational capability in the framework of the tasks set for efficient configuration, configuration of the structure, diagnostics and control of electric drives of the EPBMF type.

**Key words:** electric drive, control panel, configuration software package.

Управление современными многофункциональными электроприводами с переменной структурой требуют относительно простого, наглядного и эффективного интерфейса. Вариантом решения такой задачи является Конфигурационный пакет (КП) программ PhasimDA, специально разработанный для электропривода бесконтактного с фазовой модуляцией (ЭПБФМ). Он предназначен для управления, настройки, отладки, обслуживания и конфигурирования электропривода. Пакет может работать на ПК под управлением ОС Windows 7 и более поздних версий. При этом ПК не требует дополнительных аппаратных средств, но должен иметь последовательный порт.

Кроме основных функций управления такой конфигурационный пакет включает в себя ряд важных и полезных функций, например, функция графического анализа режимов работы приводного механизма, функция ручного и автоматического переноса параметров конфигурации с одного электропривода на другой и т.д. Пакет имеет также встроенные функции программирования, контроля, диагностики электропривода и его технического обслуживания. Помимо этого, он может являться средством обучения персонала для работы с электроприводами типа ЭППФМ.

Пакет PhasimDA представляет собой универсальный инструмент гибкого оперативного управления приводами ЭППФМ. Он обеспечивает следующие возможности:

1. Настройку и отображение параметров привода в автоматическом и диалоговом режимах.
2. Графическое отображение и контроль текущих значений сигналов системы управления.
3. Определение скоростных, позиционных и точностных характеристик электропривода.
4. Таблицу отображения сигналов входов/выходов, позволяющую наблюдать режимы работы привода.
5. Управление, тестирование и диагностику электропривода в стандартных режимах.
6. Быструю перезагрузку и восстановление системы за счет фиксации и резервирования параметров электропривода в случае возникновения его отдельных неисправностей или полных отказов.

Описание Главного меню пакета PhasimDA представлено в табл. 1.

Главное меню включает в себя обширный набор панелей управления и индикации. В данной работе рассмотрим только панели, которые обеспечивают настройки параметров **движения электропривода**. Панель управления скоростью двигателя представлена на рис. 1. Она позволяет задавать скорость вала  $V_d$  (в дискретах) и  $V_n$  (в об/мин.). При задании скорости в выбранном масштабе производится её пересчет в требуемую систему отсчета.

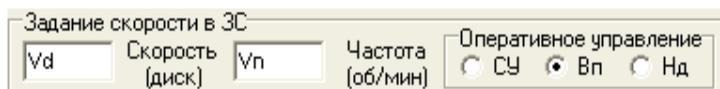


Рис. 1. Панель управления скоростью

На панели управления скоростью расположена панель оперативного управления, активируемая при включении двигателя. На панели "Оперативное управление" расположены кнопки "СУ", "Вп" и "Нд", предназначенные для быстрого изменения режима управления двигателем. Кнопки "Вп" (вперед) и "Нд" (назад) соответственно активируют после ввода нового значения скорости, при запуске и реверсе системы. При этом заданный модуль частоты вращения двигателя сохраняется. Кнопка "СУ" обеспечивает перевод двигателя в режим "Силовой удержания", когда двигатель обеспечивает заданный момент на валу при "нулевой" скорости. Кнопки "Вп" и "Нд" действуют только при подключенном к ШИП двигателю (панель "Контактор" красного цвета).

Панель задания величины перемещения или координаты конечной точки при позиционировании представлена на рис. 2.

Таблица 1. Описание главного меню пакета PhasimDA

Пункт меню	Пункт подменю	Выполняемые операции
Файл	Сохранить настройки	Сохраняет текущие настройки контроллера в файле инициализации параметров, задаваемом в файле инициализации КП
	Сохранить как...	Сохраняет текущие настройки контроллера в произвольном файле, выбранном пользователем
	Редактировать файл	Редактирование файла инициализации параметров, задаваемого в файле инициализации КП
	Загрузить настройки	Загрузка параметров в контроллер настроек из произвольного файла инициализации
	Настройки	Настройка последовательного порта
	Масштабирование	Размещение, модернизация и масштабирование индицируемых переменных состояния электропривода
Контроль параметров		Вывод таблицы настроек контроллера
Опции	Экран	Изменение настроек изображения на экране виртуального осциллографа
	Статика	Задание регулировочных характеристик привода
	Интерфейс dsPIC	Изменение настройки регистров управления микроконтроллера
	Флаги управления	Изменение флагов задания структуры контроллера
	Программ. входов	Задание режимов обработки тактильных датчиков входов
	СТОП (F1)	Отключение двигателя от сети
	Позиционирование (F12)	Запуск режима позиционирования
	Пуск (F2)	Запуск режима управления двигателем.
	Вверх (F5)	Движение в выбранном направлении с заданной скоростью
	Сил. уд. (F6)	Силовое удержание
	Вниз (F7)	Движение в направлении, противоположном выбранному с заданной скоростью
	Перезагрузка	Перезагрузка CSEG микроконтроллера
Разрешение ДПР	Установка числа меток используемого датчика положения	
Выход		Выход из КП с возможностью сохранения настроек контроллера электропривода



Рис. 2. Панель задания перемещения при позиционировании

Величина перемещения вводится в окне "Приращение", подсвеченном зеленым цветом. После набора величины перемещения нажимает-

ся кнопка "Запись". Передача данных в контроллер электропривода выполняется командой "Enter". Панель позволяет также выбрать алгоритм позиционирования с помощью соответствующего флажка "G91".

1. Панель настроек регуляторов скорости и фазы электропривода представлена на рис. 3.

Переключатель "SP" обеспечивает выбор точки подключения регулятора фазы, которая указывается направлением стрелки на кнопке "SP". В окне "DF" в виде рисунка задается метод дефаззификации регулятора скорости электропривода.

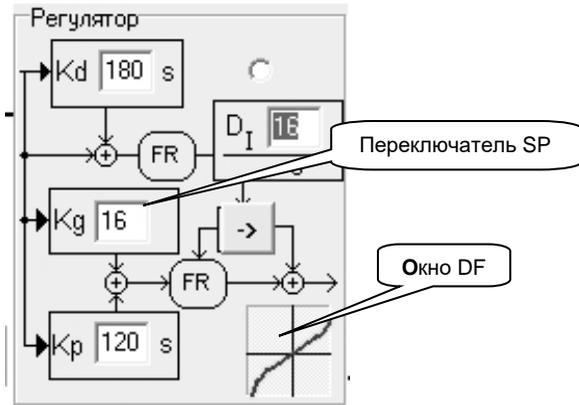


Рис. 3. Панель настроек регуляторов скорости и фазы

Кроме того в пакете PhasimDA управления движением предусмотрены следующие панели настройки: "Способ управления", "Число контуров регулируемых переменных", "Регулятор тока", "Наблюдатель тока", "Нечеткий регулятор", "Структура САУ электропривода", "Задатчик интенсивности", "Преобразователь частоты" и "Виртуальный осциллограф", которые в совокупности обеспечивают надежное и эффективное управление электроприводом.

## СЕКЦИЯ 19. «РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

УДК 621.314

В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доц, Г.А. ФИЛАТОВА<sup>1</sup>, ст. преп,  
А.С. КОРМУШКИН<sup>2</sup>, ведущий инженер ООО «Сименс»

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

*E-mail: <sup>1</sup>fgala90@mail.ru*

<sup>2</sup>ООО «Сименс»

115184 г. Москва, ул. Большая Татарская, 9

*E-mail: alexander.kormushkin@siemens.com*

### **Использование микропроцессорных терминалов серии SIPROTEC в учебном процессе магистров**

**Аннотация.** Показано внедрение современных микропроцессорных устройств релейной защиты в учебный процесс на примере использования терминалов серии SIPROTEC (Siemens) в курсе микропроцессорных защит магистров профиля 140400.68 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

**Ключевые слова:** микропроцессорная релейная защита, устройства SIPROTEC, образовательные технологии

V.D. LEBEDEV, Ph.D, G.A. FILATOVA<sup>1</sup>, assistant,  
A.S. KORMUSHKIN<sup>2</sup>, principal engineer

<sup>1</sup>Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

*E-mail: <sup>1</sup>fgala90@mail.ru*

<sup>2</sup>LLC Siemens

115184 Moscow, Bolshaja Tatarskaja Str, 9

*E-mail: alexander.kormushkin@siemens.com*

### **Usage of SIPROTEC microprocessor protection relays in educational process of masters**

**Abstract.** The implementation of modern digital relay protection devices into the educational process is demonstrated with the example of SIPROTEC (Siemens) terminals usage in the course of microprocessor relay protection of Masters, profile 140400.68 "Relay Protection and Automation of Electric Power Systems"

**Key words:** microprocessor relay protection, SIPROTEC devices, educational technologies

**Введение.** В учебном процессе магистров профиля «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» большое внима-

ние уделяется получению практических навыков работы с современными устройствами микропроцессорной защиты и автоматики, отработка которых предполагается в том числе во время лабораторных занятий по дисциплине «Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики» («МПУ РЗА»). Данный курс является логическим продолжением курсов «Релейная защита электроэнергетических систем», «Автоматика электроэнергетических систем», «Релейная защита электроэнергетических объектов». Содержание дисциплины «МПУ РЗА» охватывает круг вопросов, связанных с принципами построения цифровых микропроцессорных защит, особенностями архитектуры и совместимостью с информационно-техническими системами энергетического объекта. Дисциплина нацелена на формирование прежде всего профессиональных компетенций (ПК-1 ПК-15, ПК-17, ПК-24, ПК-42, ПК-45, ПК-46, ПК-50) выпускника, соответствующих ФГОС-3.

На объектах электроэнергетики в России (особенно классом напряжения 110 кВ и выше) нередко применяются устройства, произведенные зарубежными компаниями, которые обладают своими отличительными особенностями. Знания по различным аспектам их применения дают будущим специалистам преимущества на рынке труда и помогают в дальнейшем лучше ориентироваться в области релейной защиты.

Устройства защиты фирмы SIEMENS зарекомендовали себя как надежные устройства, обладающие всеми необходимыми функциями, реализующими преимущества использования микропроцессорной элементной базы, такими как гибкая программируемая логика, встроенные алгоритмы ОМП, осциллографирование и т.п. [1] (рис. 1).

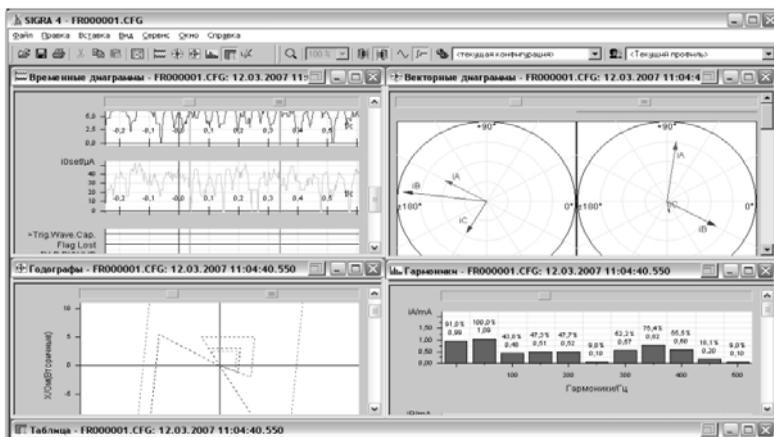


Рис. 1. SIGRA 4, графический анализ повреждений, пример

Данная статья посвящена результатам использования современных микропроцессорных устройств серии SIPROTEC при проведении лабораторных работ по дисциплине «МПУ РЗА». Лабораторные работы разработаны на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ИГЭУ совместно с инженерами подразделения «Автоматизация в энергетике» с использованием материалов семинаров «Релейная защита SIPROTEC для магистральных и распределительных сетей», которые проводит учебный центр ООО «Сименс», г. Москва.

В учебных лабораториях кафедры АУЭС установлены терминалы защиты присоединения 7SJ62/64, а также шкафы основной и резервной защиты линии электропередачи на базе терминалов 7SA522, 7SD52 и 6MD66 [2].

**Цель и задачи лабораторных работ.** Целью работ является получение навыков работы с микропроцессорными терминалами.

Задачи лабораторных работ:

- выбор типа терминала и его функций для заданного объекта;
- подключение внешних цепей и параметрирование терминала;
- наладка и опытная проверка работы функций терминала;
- освоение специализированных программ DIGSI 4 и SIGRA;
- разработка схем гибкой логики и их создание в редакторе логики CFC.

В настоящий момент разработан специализированный лабораторный стенд, в состав которого входят: терминалы SIPROTEC 7SJ62/64; персональный компьютер с программами DIGSI 4 и SIGRA; лабораторная модель трехфазного выключателя; испытательный комплекс «Ретом-51»; источники постоянного и переменного напряжения.

Для работы на данном стенде разработаны следующие лабораторные задания:

1. Управление трехфазной моделью выключателя с помощью терминала SIPROTEC 7SJ62/64.
2. Переключение набора уставок в зависимости от величины тока и/или по истечению заранее заданного времени.
3. Создание мигающей индикации светодиода при помощи редактора гибкой программируемой логики.
4. Настройка дисплея управления: индикация потока энергии; индикация положения коммутационных аппаратов.
5. Настройка функции защиты по скорости изменения частоты.
6. Настройка функции АПВ. Реализация различных алгоритмов АПВ в редакторе гибкой логики CFC.

На выполнение каждого задания отводится от 1 до 4-х часов. Задания имеют творческую составляющую и не имеют строгого, единственно верного решения. Большое внимание уделяется организации самостоятельной работы студентов: подготовлен справочный материал, список литературы, контрольные вопросы для самоконтроля.

С использованием шкафов защит воздушных линий электропередачи и испытательного комплекса «Ретом-51» разрабатываются следующие лабораторные работы:

1. Изучение функции дистанционной защиты на базе терминала 7SA52 [2].

2. Изучение функции ДЗЛ на базе терминала 7SD52.

3. Изучение дополнительных функций терминалов.

На базе лабораторных работ также планируется разработка расчетно-графической или курсовой работы.

### Литература

1. **Siprotec 4**: системное описание. URL: <http://smart-grid.siemens.ru/products/>
2. **Брызгалов Е.А., Филатова Г.А., Лебедев В.Д.** Исследование дистанционной защиты на базе устройства 7SA52 // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3 т. – Т. 3. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 402.

УДК 621.316.925

М.О. АНДРЕЕВ, студент;  
О.В. ФРОЛОВА<sup>1</sup>, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: <sup>1</sup>loga-ispu@yandex.ru

### **Анализ вариантов согласования дистанционной защиты автотрансформатора с дистанционными защитами отходящих линий**

**Аннотация.** Проведен анализ вариантов согласования дистанционной защиты автотрансформатора с дистанционными защитами линий, отходящих от шин высшего и среднего напряжения. Определены преимущества и недостатки всех вариантов, а также предложен комбинированный вариант согласования защиты.

**Ключевые слова:** автотрансформатор, дистанционная защита, согласование.

М.О. ANDREEV student,  
O.V. FROLOVA Candidate of Engineering, docent  
Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: loga-ispu@yandex.ru

### **Analysis of the autotransformer distance protection coordination variants with distance protection outgoing lines**

**Abstract.** The analysis of the autotransformer distance protection coordination variants with distance protection of line outgoing from the high and medium voltage

bus. Identified the advantages and disadvantages of all variants, also provides a combined coordination variant of protection.

**Keywords:** autotransformer, distance protection, coordination.

Дистанционная защита (ДЗ) является защитой относительной селективности, поэтому при согласовании важна конфигурация электрической сети на стороне высшего и среднего напряжения (ВН и СН) автотрансформатора (АТ). Анализ согласования характеристик дистанционной защиты проводился на примере подстанции “Заря” Московского МПЭС с автотрансформаторами АТДЦТН-200000/220/110. На стороне ВН АТ отходит две двухцепные линии электропередачи (ЛЭП) 220 кВ, на стороне СН отходят одна двухцепная и две одноцепных ЛЭП 110 кВ. Логика работы защиты зависит от схемы распределительных устройств. На стороне ВН АТ схема расщепления – “Две рабочие системы шин”, на стороне СН – “Две рабочие и обходная система шин”. Схема рассматриваемой сети представлена на рис. 1.

Для реализации резервной дистанционной защиты автотрансформатора используется терминал серии SIPROTEC 7SA6 фирмы “Siemens”. Расчет уставок производится в соответствии со стандартом [1], где предполагается, что ступени дистанционной защиты, направленные в сторону смежного напряжения, как правило, используются для целей полноценного или частичного ближнего резервирования в зоне действия основных защит АТ.

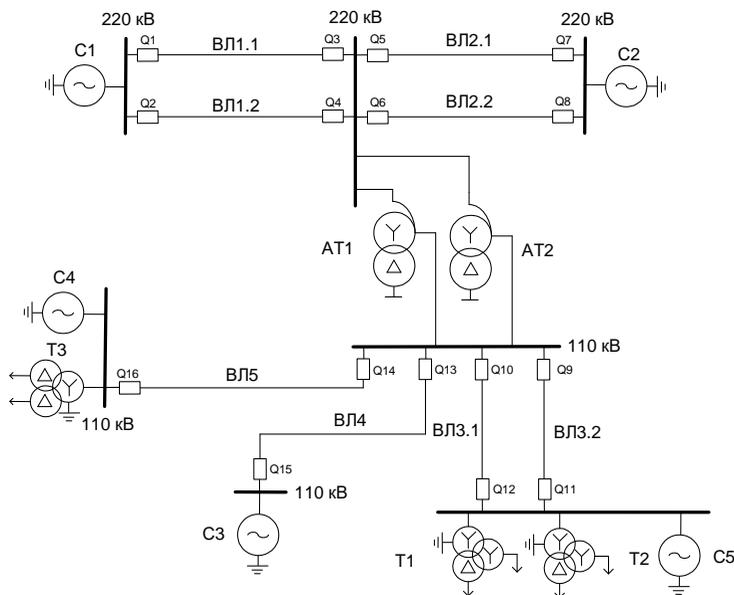


Рис. 1. Схема электрической сети

Вследствие соотношения сопротивлений сторон (обмоток) АТ (как правило, обмотка низшего напряжения (НН) АТ имеет наибольшее сопротивление), согласование по сопротивлению срабатывания ступеней ДЗ, направленных в сторону АТ, с защитами присоединений смежного напряжения АТ оказывается затруднительным. В таких случаях стандарт советует руководствоваться одним из трех возможных вариантов решения указанной проблемы:

1. Параметры срабатывания ступени от всех видов коротких замыканий ДЗ на стороне ВН (СН) выбираются по условию отстройки от КЗ на шинах смежных напряжений СН и НН (ВН и НН) с  $K_{отс} = 0,8$  [2].

2. Параметры срабатывания ступени от всех видов коротких замыканий ДЗ на стороне ВН(СН) выбираются по условию охвата обмоток смежных напряжений СН и НН (ВН и НН) с  $K_{ч} = 1,2$ . Для обеспечения несрабатывания защиты в сети смежного напряжения СН (ВН), выполняется взаимное блокирование действия ступеней ДЗ на стороне ВН (СН) при пуске ступеней ДЗ с направлением в сеть СН (ВН), выполняемое посредством обмена бинарными сигналами между комплектами ДЗ сторон ВН и СН АТ.

3. Параметры срабатывания ступени от всех видов коротких замыканий ДЗ на стороне ВН(СН), как и во втором варианте, выбираются по условию охвата обмоток смежных напряжений СН и НН (ВН и НН). Для обеспечения селективности указанной ступени ДЗ выполняется ее согласование только по времени действия со ступенями (как правило последними) защит на стороне СН и НН (ВН и НН).

Первый вариант представляется наиболее простым. При этом, обеспечивается селективность ступени, но зона резервирования ограничена, т.к. в нее входит только часть обмотки ВН (СН) АТ. Уставка по реактивному сопротивлению в этом случае выбирается из условия отстройки от короткого замыкания на стороне смежного напряжения автотрансформатора. На рис. 2 линией 1 показана зона действия ступеней защит, направленных в сторону смежного напряжения, применимо к вышеупомянутой схеме сети. Стрелками показаны выключатели, на которые действует защита. Так же изображены зоны действия ступеней защит АТ направленных в сеть (линия 2) и защит линий (линия 3).

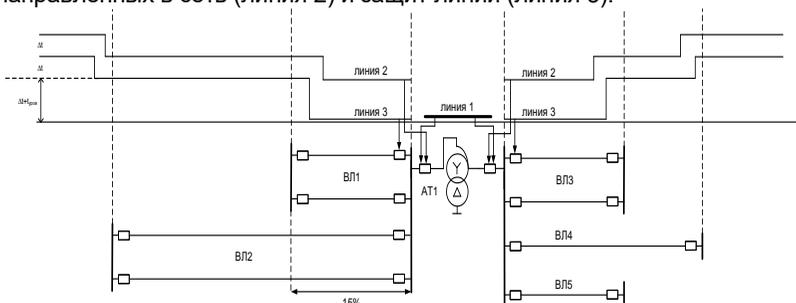


Рис. 2. Характеристики времени срабатывания согласуемых защит по первому варианту

Второй вариант представляется наиболее сложным, так как необходимо выполнить взаимное блокирование действия ступеней ДЗ при пуске ступеней ДЗ с направлением в сеть посредством обмена бинарными сигналами между комплектами ДЗ. Уставка по реактивному сопротивлению в этом случае выбирается из условия обеспечения требуемой чувствительности при коротком замыкании на шинах смежного напряжения. К плюсам этого варианта можно отнести тот факт, что все обмотки полностью попадают в зону действия защиты. Однако, для селективного действия ступени, необходимо согласование (по сопротивлению и времени срабатывания) с токовыми защитами на стороне НН АТ, что значительно затрудняет расчет. Также из-за большой величины сопротивления обмотки НН при обеспечении чувствительности на низшей стороне в рассматриваемой сети возможна неселективная работа защиты из-за наложения зоны действия защиты АТ на зону действия защит ЛЭП и защит объектов примыкающих к дальнему концу ЛЭП. На рис. 3 показаны зоны действия дистанционных защит АТ.

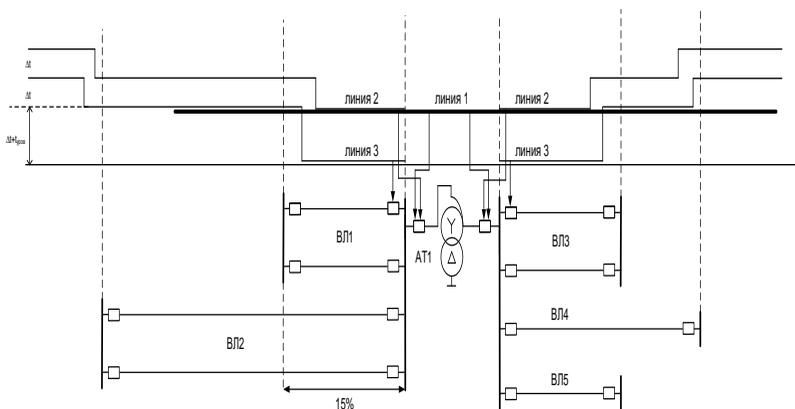


Рис. 3. Характеристики времени срабатывания согласуемых защит по второму варианту

Третий вариант предусматривает наиболее полноценное резервирование защит АТ, при минимальном обеспечении быстродействия. Обоснование выбора уставок для этого варианта аналогично второму варианту, однако отстройка по времени осуществляется относительно резервных защит АТ направленных в сеть. На рис. 4 показаны зоны действия дистанционных защит АТ направленных в сторону смежного напряжения АТ. В этом случае обеспечивается селективность работы защиты, однако время срабатывания оказывается очень большим.

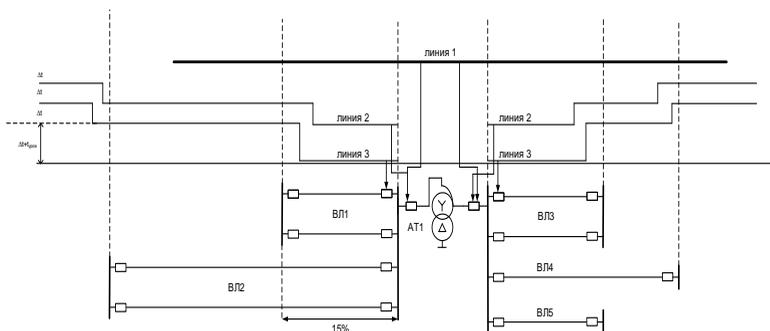


Рис. 4. Характеристики времени срабатывания согласуемых защит по третьему варианту

Возможно совмещение первого и второго вариантов, а именно обеспечить требуемую чувствительность только на стороне ВН и СН без накладки зон действия. На рис. 5 показаны зоны действия дистанционных защит для данного случая.

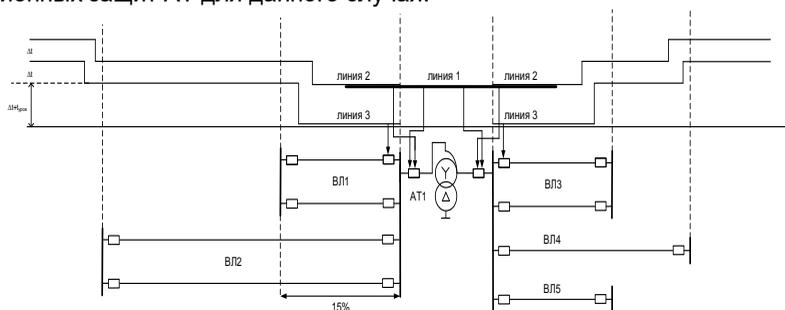


Рис. 5. Характеристики времени срабатывания согласуемых защит при объединении 1 и 2 варианта

При применении гибридного варианта согласования не вся обмотка НН находится в зоне действия защиты, однако будет обеспечена селективность и приемлемое время срабатывания.

### Литература

1. **Методические** указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА серии SIPROTEC (Siemens AG) автотрансформаторов ВН 220-750 кВ – СТО 56947007- 29.120.70.135-2012 – ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.
2. **Руководство** по эксплуатации SIEMENS C53000-G1176-C156-3 // Дистанционная защита SIPROTEC 7SA6 v4.3

УДК 621.316.925.2

А.Л. КУЛИКОВ<sup>1</sup>, д.т.н., В.Ю. ВУКОЛОВ<sup>2</sup>, к.т.н., доцент,  
А.А. ХОРИКОВ<sup>3</sup>, магистрант

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
603950, ГСП-41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

А.А. КОЛЕСНИКОВ<sup>4</sup>, инженер  
Филиал "Энергосетьпроект-НН-СЭЩ", ЗАО "ГК "Электрощит"-ТМ Самара"  
603000, г. Нижний Новгород, ул. Славянская, 19  
E-mail: *inventor61@mail.ru<sup>1</sup>, vvucolov@mail.ru<sup>2</sup>, khorikov.a@yandex.ru<sup>3</sup>,  
anton8094@mail.ru<sup>4</sup>*

## **Моделирование дифференциальной защиты распределительной сети 35 кВ на основе метода двойной записи в программном комплексе PSCAD**

**Аннотация.** Разработана модель дифференциальной защиты распределительной сети 35 кВ на основе метода двойной записи, позволяющая оценить работоспособность и перспективность внедрения защит данного типа.

**Ключевые слова:** дифференциальная защита, моделирование, PSCAD.

A.A. KULIKOV Doctor of Engineering,  
V.U. VUKOLOV Candidate of Engineering, docent,  
A.A. KHORIKOV, Master student of Engineering,

Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alekseev  
603950, GSP-41, N. Novgorod, Minin St., 24.

A.A.KOLESNIKOV, engineer  
Branch office «Energosetproekt-NN-SESH», «The Electroshield Samara Group»  
603000, N. Novgorod, Slavjanskaja St., 19.  
E-mail: *inventor61@mail.ru<sup>1</sup>, vvucolov@mail.ru<sup>2</sup>, khorikov.a@yandex.ru<sup>3</sup>,  
anton8094@mail.ru<sup>4</sup>*

## **Simulation the differential protection of a distribution network 35 kV on the basis of the method of double entry in the software package PSCAD**

**Abstract.** Developed model of differential protection of a distribution network 35 kV on the basis of the method of double entry, which allows to assess the operability and promising implementation this type of protection.

**Key words:** differential protection, simulation, PSCAD.

Реализация централизованной дифференциальной защиты распределительной сети с применением метода двойной записи подробно изложена в работе [1]. При формировании условий срабатывания, дифференциальная защита сети (ДЗС) производит сравнение токов

для отдельных участков сети и выявляет потенциально поврежденный элемент. Далее защита проверяет, вызвано ли срабатывание пускового органа коротким замыканием (КЗ) на рассматриваемом участке, либо имеет место неисправность оборудования - трансформаторов тока или линий связи. Неисправность выявляется с помощью наличия избыточной информации о токах, измеренных на концах защищаемых объектов и сформированных в специальные матрицы.

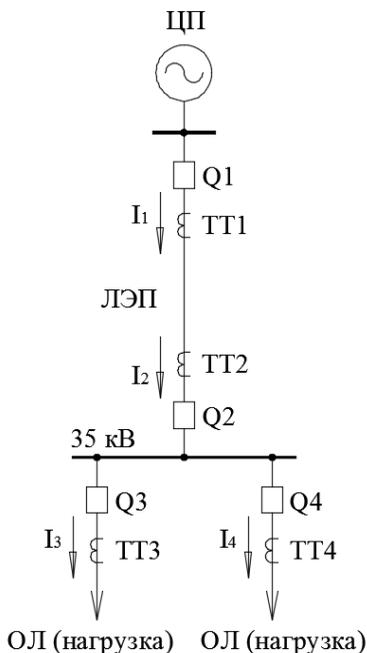


Рис. 1. Схема участка распределительной сети 35 кВ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности внедрения дифференциальной защиты с применением метода двойной записи в распределительных сетях. Это особенно актуально в связи с появлением современных информационных технологий, позволяющих реализовать надежные и имеющие низкую стоимость каналы связи. Защита целесообразна к применению в интеллектуальных электрических сетях (Smart Grid).

Цель работы - апробировать работоспособность данной защиты с использованием программного комплекса PSCAD на примере участка электрической сети 35 кВ, состоящего из источника питания, линии, шин 35 кВ, трансформаторов тока, нагрузок и выключателей (рис.1).

Функциональная схема защиты имеет следующие основные части: дифференциальная защита линии (ДЗЛ), дифференциальная защита шин 35 кВ (ДЗШ), контролирующий орган ДЗС. Характеристики срабатывания защит ДЗЛ и ДЗШ приняты на основании [2], [3], уставка срабатывания контролирующего органа ДЗС выбирается из условия отстройки от тока небаланса в нагрузочном режиме.

На рис. 2 приведены схемы пусковых органов защит применительно для фазы А.

Испытания модели показали работоспособность рассматриваемой защиты. При КЗ в зоне защиты происходило срабатывание и селективное отключение поврежденного участка. При неисправности трансформаторов тока срабатывание защиты не наблюдалось.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности внедрения дифференциальной защиты с применением метода двойной записи в распределительных сетях. Это особенно актуально в связи с появлением современных информационных технологий, позволяющих реализовать надежные и имеющие низкую стоимость каналы связи. Защита целесообразна к применению в интеллектуальных электрических сетях (Smart Grid).

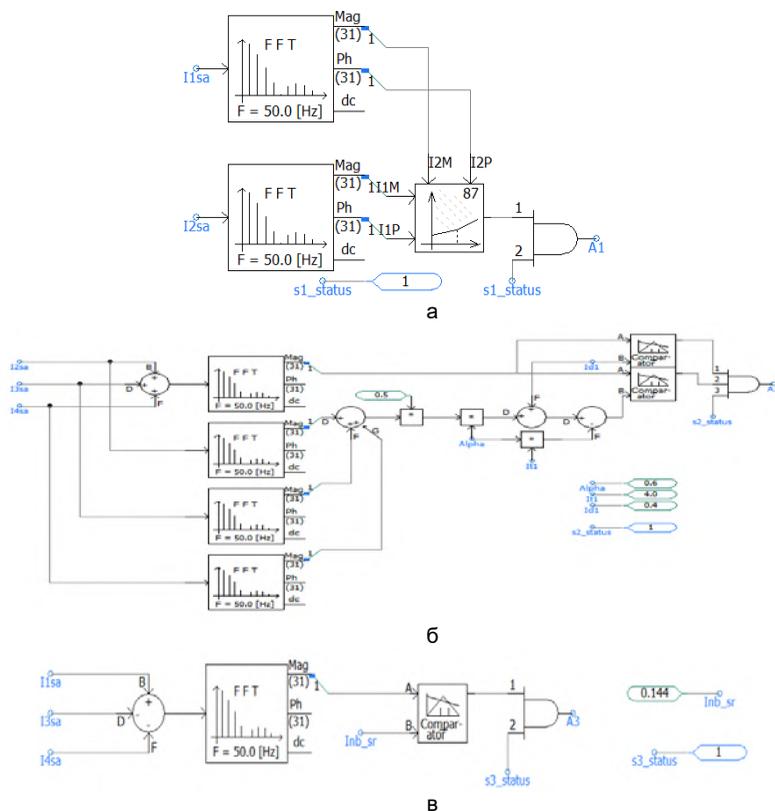


Рис. 2. Фрагмент функциональной схемы защиты: а – пусковой орган ДЗЛ, б – пусковой орган ДЗШ, в – контролирующий орган ДЗС

### Литература

1. Куликов А. Л., Вуколов В. Ю., Колесников А. А. Централизованная дифференциальная защита распределительных сельских сетей 6–35 кВ с применением метода двойной записи // Вестник НГИЭИ. 2017. № 2 (69). С. 71–81.
2. **Рекомендации** по применению и выбору уставок устройства дифференциальной защиты линий «Сириус-2-ДЗЛ-01». ЗАО «РАДИУС Автоматика». Редакция от 27.07.2010 г.
3. **Рекомендации** по выбору уставок устройств дифференциальной защиты шин и ошиновки «Сириус-3-ДЗШ-01» и «Сириус-3-ДЗО-01». ЗАО «РАДИУС Автоматика». Редакция от 31.07.2012 г.

УДК 621.316.925

Е.А. ВОРОБЬЕВА, аспирант,  
О.А. ДОБРЯГИНА, к.т.н.,  
Т.Ю. ШАДРИКОВА, к.т.н.,  
В.А. ШУИН<sup>1</sup>, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
*E-mail: <sup>1</sup>shuin@rza.ispu.ru*

### **Влияние высших гармоник на условия гашения заземляющей дуги при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ<sup>1</sup>**

**Аннотация.** Приведены результаты исследований влияния высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю на условия гашения заземляющей дуги в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью, величину максимальных перенапряжений и эффективное значение тока в месте повреждения.

**Ключевые слова:** кабельные сети 6-10 кВ, изолированная нейтраль, однофазные замыкания на землю, высшие гармоники, гашение заземляющей дуги

E.A. VOROBYEVA, graduate student,  
O.A. DOBRIAGINA, Ph.D.,  
T.Yu. SHADRIKOVA, Ph.D.,  
V.A. SHUIN, Doctor of Technical Sciences, Professor

Ivanovo State Power Engineering University  
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34  
*E-mail: <sup>1</sup>shuin@rza.ispu.ru*

### **The influence of higher harmonics on conditions of grounding arc extinction at earth faults in cable networks of 6-10 kV voltage**

**Abstract.** The article presents the research results of the influence of higher harmonics in the current of single-phase earth fault on conditions of grounding arc extinction in cable networks of 6-10 kV voltage with isolated neutral, the maximum overvoltages magnitude and the current effective value at fault location.

**Keywords:** 6-10 kV cable networks, isolated neutral, single-phase earth faults, higher harmonics, grounding arc extinction

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в Ивановском государственном энергетическом университете в рамках федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" на тему "Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локации однофазных замыканий на землю в рас-пределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ" (шифр заявки 2016-14-579-0009-150, договор на получение субсидии 14.577.21.0215 от 3 октября 2016 г., уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215).

**Введение.** Наиболее опасной разновидностью однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, являются дуговые перемежающиеся замыкания (ДПОЗЗ), сопровождающиеся опасными перенапряжениями на неповрежденных фазах во всей электрически связанной сети и значительным (в 10 и более раз) и увеличением эффективного значения тока в месте повреждения [1, 2 и др.]. Кратности максимальных перенапряжений и амплитуды бросков переходных токов определяются прежде всего условиями гашения и повторного зажигания дуг.

Уровень высших гармоник (ВГ) в токе ОЗЗ может оказывать существенное влияние на условия гашения и повторных зажигания дуг. Максимальный расчетный уровень ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ по данным [3] может достигать значений до 65% от суммарного емкостного тока сети  $I_{c\Sigma}$ , что достаточно хорошо коррелируется с оценками, полученными на основе экспериментальных измерений в реальных сетях [например, 4, 5].

**О подходе к оценке влияния ВГ на условия гашения и повторного зажигания дуги при ОЗЗ.** Достаточно точная оценка влияния ВГ на условия гашения и повторного зажигания дуг затруднительна. Для приближенной оценки указанного влияния можно воспользоваться существующими теориями возникновения перенапряжений при дуговых ОЗЗ в электрических сетях с изолированной нейтралью: W. Petersen [6] и Белякова Н.Н. [7]. В отличие от теории W. Petersen теория Белякова Н.Н. не ограничивает длительность горения заземляющей дуги первой полуволной переходного тока ОЗЗ и увязывает условия ее гашения с критической крутизной переходного тока, при которой становится возможным принудительное гашение заземляющей дуги и которую косвенно можно оценить по величине т.н. "пика гашения"  $U_{п.г}$  – первого после момента гашения дуги пика восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе. Для кабельных сетей напряжением 6 кВ  $U_{п.г} \approx 0,37 U_{ф.т.}$ , 10 кВ –  $U_{п.г} \approx 0,22 U_{ф.т.}$  [7].

**Метод исследования.** Учитывая сложность переходных процессов, возникающих в кабельных сетях 6–10 кВ при пробоях изоляции фазы сети на землю и гашениях заземляющих дуг, наиболее эффективным методом исследований является применение системы имитационного моделирования Matlab с пакетами расширения SimPowerSystem и Simulink.

При параметрировании имитационных моделей использовались предельные и средние значения параметров элементов кабельных сетей 6–10 кВ, полученные на основе статистического анализа данных по системам промышленного и городского электроснабжения.

При проведении вычислительных экспериментов значения суммарного емкостного тока сети с  $U_{ном} = 6$  кВ принимались равными  $I_{c\Sigma} = 5$  А, 10 А и 30 А, суммарный уровень ВГ в токе ОЗЗ – 0,65  $I_{c\Sigma}$  [3]. При моделировании рассматривались ДПОЗЗ на шинах центра питания, сопро-

вождающиеся максимальными перенапряжениями и бросками переходного тока.

**Анализ влияния ВГ в токе ОЗЗ.** В таблице приведены основные результаты вычислительных экспериментов на имитационных моделях кабельных сетей 6 кВ.

Из табл. 1 можно видеть, что при ДПОЗЗ по теории Белякова Н.Н. увеличение уровня ВГ в токе ОЗЗ приводит к увеличению кратности перенапряжений на неповрежденной фазах от  $K_T \approx 2,5-2,6$  до значений 2,9–3,0, т.е. ее возрастанию примерно на 15–16% и увеличению среднеквадратичного значения тока в месте повреждения на 17–22%. При ДПОЗЗ по теории W. Petersen увеличение уровня ВГ в токе ОЗЗ до максимального расчетного значения приводит к увеличению кратности перенапряжений на неповрежденных фазах на 13–14% и увеличению среднеквадратичного значения тока в месте повреждения на 10–13%.

Таблица 1. Значения перенапряжений и среднеквадратичные значения тока в месте повреждения в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью в зависимости от уровня ВГ в токе ОЗЗ

Вид ОЗЗ	Пар-р	$I_{c\Sigma} = 5 \text{ A}$		$I_{c\Sigma} = 10 \text{ A}$		$I_{c\Sigma} = 30 \text{ A}$	
		$K_{\text{инс}} = 0\%$	$K_{\text{инс}} = 65\%$	$K_{\text{инс}} = 0\%$	$K_{\text{инс}} = 65\%$	$K_{\text{инс}} = 0\%$	$K_{\text{инс}} = 65\%$
ДПОЗЗ по теории Белякова Н.Н.	$U_{\text{Стаж}}, \text{ В}$	13500	15500	13300	15500	12920	15000
	$I_{\text{эфф}}, \text{ А}$	81	86	113	132	214	263
	$K_T$	2,63	3	2,59	3	2,51	2,92
ДПОЗЗ по теории W. Petersen	$U_{\text{Стаж}}, \text{ В}$	20000	22800	21000	24000	17500	19800
	$I_{\text{эфф}}, \text{ А}$	145	160	225	254	380	430
	$K_T$	3,9	4,43	4,1	4,67	3,4	3,85

**Заключение.** При максимальном расчетном уровне ВГ в токе ОЗЗ 65% от  $I_{c\Sigma}$  момент гашения дуги затягивается на 1–3 полупериода колебаний переходного тока, увеличивая первый пик гашения  $U_{п.г}$  на 12–40%, кратность максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах при ДПОЗЗ на 13–16% и эффективное значение тока в месте повреждения на 10–22% по сравнению с суммарным емкостным током сети.

#### Литература

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971.
2. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С. и др. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений. СПб.: Энергоатомиздат, 2002.

3. **Винокурова Т.Ю., Шагурина Е.С., Шуйн В.А.** Методика выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит от замыканий на землю на основе высших гармоник в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ землю // Вестник ИГЭУ. Вып. 3. – 2015. – С. 20–28.
4. **Вайнштейн, В.Л.** Исследование высших гармоник тока замыкания на землю // Промышленная энергетика. – № 1. – 1986. – С. 39–40.
5. **Ширковец А.И.** Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги // Релейная защита. – 2011. – № 4. – С. 14–19.
6. **Petersen W.** Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. - ETZ, 1917, N. 37, 38.
7. **Беляков Н.Н.** Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 31–36.

УДК 621.311

Г.А. ФИЛАТОВА<sup>1</sup>, ст. преп., Е.А. ВОРОБЬЕВА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34  
E-mail: fgala90@mail.ru<sup>1</sup>

### **Использование параметров электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в сетях напряжением 6-10 кВ**

**Аннотация.** Показано, что наиболее эффективный алгоритм решения рассматриваемой задачи можно получить при замере переходного напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока  $i_0(t)$  в моменты времени перехода  $i_0(t)$  нулевые значения.

**Ключевые слова:** распределительные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), on-line методы определения места замыкания, информационные параметры величин переходного процесса.

G.A. FILATOVA<sup>1</sup>, assistant., E.A. VOROBIEVA, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University  
153003 Ivanovo Rabfakovskaya St., 34  
E-mail: <sup>1</sup>rza@rza.ispu.ru

### **Using of parameters of the electrical values at transient process for earth faults location in 6-10 kV networks**

**Abstract.** It is shown that the most efficient algorithm for solving the problem under consideration can be obtained by measuring the transient voltage of the damaged phase and the derivative of the transient current  $i_0(t)$  at the transition times  $i_0(t)$  crosses zero value.

**Key words:** distribution networks 6-10 kV, single-phase earth faults, on-line methods of fault location, information parameters of the values of the transient process.

**Введение.** Через кабельные сети напряжением 6-10 кВ распределяется более половины вырабатываемой в России электроэнергии [1]. Эксплуатационная надежность кабельных сетей 6-10 кВ существенно зависит от технического совершенства средств локализации ОЗЗ, обеспечивающих определение поврежденного присоединения и места (зоны) повреждения на кабельной линии (КЛ), находящейся под рабочим напряжением. Первая из указанных задач решается с помощью устройств селективной сигнализации ОЗЗ [2], вторая – применением специальных методов и средств определения места ОЗЗ (ОМЗЗ) на поврежденной КЛ. От эффективности последних зависит быстрота определения места повреждения на КЛ и возможность его ликвидации без нарушения электроснабжения потребителей.

**Приближенное аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ на основе двухчастотной схемы замещения кабельной сети 6-10 кВ [3].** В переходном процессе при ОЗЗ в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю принято различать две основные стадии, связанные соответственно с разрядом емкостей поврежденной фазы, сопровождающимся перезарядом междуфазных емкостей, и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз сети. На рис. 1 приведена комплексная схема замещения по методу симметричных составляющих, соответствующая трехфазной схеме замещения по [3].

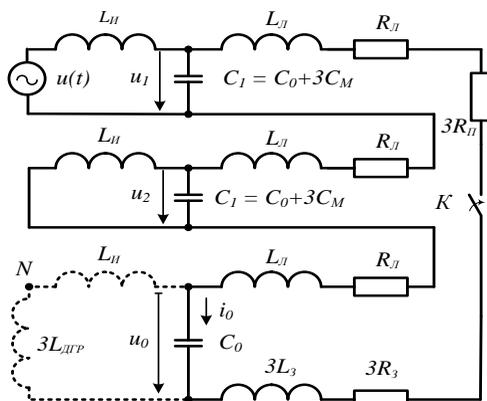


Рис. 1. Комплексная схема замещения по методу симметричных составляющих

Для сети, работающей с изолированной нейтралью, из схемы замещения по рис. 1 при  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$  и "малых потерь" в контуре тока ОЗЗ, когда разрядные и зарядные составляющие электрических величин переходного процесса сохраняют колебательный характер, в [3] получено приближенное решение для напряжения  $u_0(t)$ :

$$u_0(t) = u_{0пр}(t) + u_{0р}(t) + u_{0з}(t) \approx U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_{рм} e^{-\delta_{рt}} \cos \omega_{рt} - U_{зм} e^{-\delta_{зt}} \cos \omega_{зt}, \quad (1)$$

где  $u_{0пр}(t)$ ,  $u_{0р}(t)$ ,  $u_{0з}(t)$  – соответственно принужденная, разрядная и зарядная составляющие переходного напряжения нулевой последовательности;  $U_{рм}$ ,  $U_{зм}$ ,  $\omega_{р}$ ,  $\omega_{з}$ ,  $\delta_{р}$ ,  $\delta_{з}$  – соответственно амплитуды, частоты и постоянные затухания разрядной и зарядной свободных составляющих, определяемые по выражениям:

Из схем замещения по рис. 1 для переходного тока в месте ОЗЗ и в поврежденной фазе получим

$$i_3 = 3i_0 = 3C_0 \frac{du_0}{dt} = i_{0пр} + i_{0р} + i_{0з} = 3C_0 \frac{d}{dt} (u_{0пр} + u_{0р} + u_{0з}). \quad (2)$$

При известных напряжении  $u_0$  и токе  $i_0$  напряжение на поврежденной фазе А также определяется из схемы замещения по рис. 2 как сумма составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$u_A = u_1 + u_2 + u_0 \quad (3)$$

**Параметры электрических величин переходного процесса, используемые для решения задачи ОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.** Для решения задачи ОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ могут быть использованы электрические величины переходного процесса, которые технически могут быть измерены и параметры которых существенно зависят от удаленности места повреждения  $l_3$  от шин контролируемого объекта. К таким электрическим величинам переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ относятся: переходное напряжение  $u_0(t)$ ; переходный ток  $i_0(t)$ ; переходное напряжение поврежденной фазы  $u_{\phi}(t)$ .

На рис. 2 приведены зависимости  $u_{\phi}(t)$ ,  $3u_0(t)$  и  $3i_0(t)$  для кабельной сети 6 кВ с суммарным емкостным током  $I_{сз} \approx 30$  А.

Из кривых, приведенных на рис. 2, можно видеть, что наиболее очевидными параметрами, зависящими от удаленности  $l_3$  места ОЗЗ от шин источника питания, являются временные параметры – длительности первых полуволн переходного тока  $3i_0(t)$ , переходного напряжения поврежденной фазы  $u_{\phi}(t)$ , моменты времени, соответствующие первому максимуму переходного тока  $3i_0(t)$  и переходного напряжения  $3u_0(t)$ , а также параметры, характеризующие крутизну передних фронтов  $u_{\phi}(t)$ ,  $3u_0(t)$  и  $3i_0(t)$  – начальные значения производных указанных величин.

**Факторы, влияющие на параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ.** Значения электрических величин переходного процесса, и их производных зависят от начальной фазы пробоя изоляции  $\varphi$  и напряжения смещения нейтрали сети  $u_n(0)$  в момент возникновения ОЗЗ. Влияние начальной фазы пробоя изоляции  $\varphi$  и смещения нейтрали сети  $u_n(0)$  на значения измеренных величин можно

исключить, если для решения задачи ОМЗЗ использовать не полные токи и напряжения, а их нормированные свободные составляющие.

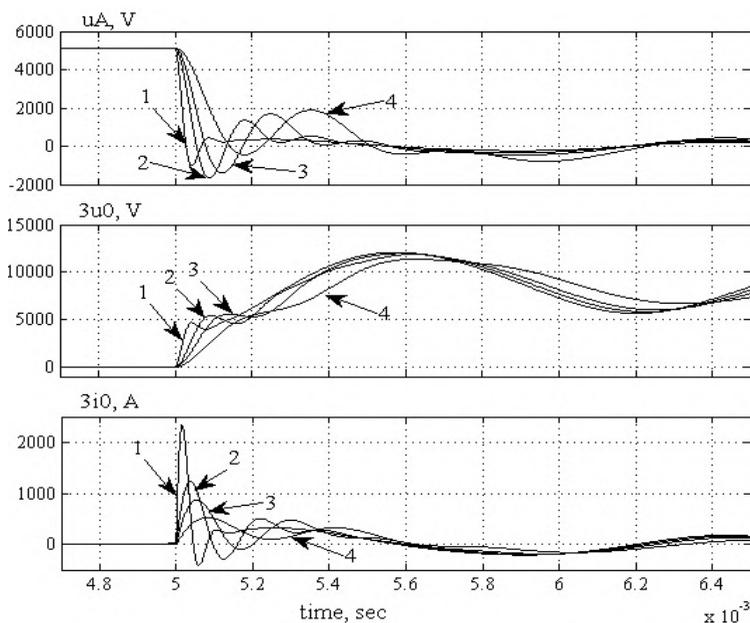


Рис. 2. Электрические величины переходного процесса для кабельной сети 6 кВ,  $I_{сз} = 25$  А,  $R_{л} = 1$  Ом при различных значениях удаленности ОЗЗ от шин:  
1 –  $l_3 = 0,1$  км; 2 –  $l_3 = 1$  км; 3 –  $l_3 = 2$  км; 4 –  $l_3 = 5$  км

Основными факторами, влияющими на точность решения задачи ДОМЗЗ с использованием параметров электрических величин переходного процесса в сетях 6–10 кВ, являются величина суммарного емкостного тока, который может изменяться в зависимости от режима работы контролируемой сети, а также активное сопротивление контура тока ОЗЗ (включая  $R_{л}$ ). Поэтому наиболее эффективными информационными параметрами электрических величин переходного процесса следует считать те из них, которые не критичны к влиянию указанных факторов.

**Использование для дистанционного ОМЗЗ (ДОМЗЗ) параметров производной переходного тока  $i_0(t)$ .** Из (1) и (2) при малых активных потерях в контуре тока ОЗЗ и соотношениях для частот разрядной и зарядной составляющих  $\omega_p^2 \gg \omega_3^2$ ,  $\omega_p^2 \gg \omega^2$ ,  $\omega_3^2 \gg \omega^2$  получим:

$$\begin{aligned} i_0'(0) \approx C_0 a_1 U_m \sin \varphi \left[ 1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] (\omega^2 - a_1 \delta_B^2 + \\ + a_1 \omega_B^2 + a_2 \omega_C^2 - a_2 \delta_C^2) \approx \frac{U_m \sin \varphi \left[ 1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right]}{L_1}. \end{aligned} \quad (4)$$

При использовании нормирования измеренных значений напряжения переходного тока  $i_0(t)$  из (4) получим

$$i_0'(0) \approx \frac{U_m}{L_1}, \quad (5)$$

где  $L_1 = 3L_{\Gamma} + 3L_3$ .

Как видно из (5), начальное значение производной свободных составляющих тока  $i_0(t)$  является функцией  $L_1 \equiv L_3$  и не зависит от суммарного емкостного тока сети  $i_{\Sigma}$  и активных потерь в контуре тока ОЗЗ, т.е. и от переходного сопротивления в месте повреждения.

Однако для достаточно точной фиксации начального значения производной переходного тока  $i_0(t)$  требуется быстродействующий пуск устройства ОМЗЗ, что является недостатком использования данного параметра для решения задачи ОМЗЗ. Для исключения зависимости замера значения  $i_0'(0)$  от начальной фазы пробоя изоляции  $\varphi$  и смещения нейтрали  $u_N(0)$  необходимо нормирование измеренных значений.

**Использование для ДОМЗЗ параметров напряжения поврежденной фазы  $u_{\Phi}(t)$  и производной переходного тока  $i_0(t)$ .** Рассмотренные выше свойства производной переходного тока  $i_0(t)$  могут быть более эффективно использованы в сочетании со свойствами переходного напряжения на поврежденной фазе.

Из комплексной схемы замещения (рис. 2) можно получить следующее выражение для переходного напряжения на поврежденной фазе

$$u_{\Phi}(t) = L_1 \frac{di_0(t)}{dt} + R_1 i_0(t). \quad (6)$$

Из (6) можно видеть, что зависимость измеренных значений  $u_{\Phi}(t)$  от активных потерь в контуре тока ОЗЗ можно исключить, если измерения мгновенных значений переходного напряжения  $u_{\Phi}(t)$  осуществлять в моменты перехода тока  $i_0(t)$  через нулевое значение. Для указанных моментов времени из (6) получим

$$u_A(t_{0i}) = L_1 \frac{di_0}{dt}(t_{0i}), \quad (7)$$

где  $t_{0i}$  – моменты перехода тока  $i_0(t)$  через нулевое значение ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Если для моментов времени  $t_{0i}$  определить также значения производной переходного тока  $i_0(t)$ , то из (7) получим

$$L_1(t_{0i}) = \frac{u_A(t_{0i})}{\frac{di_0}{dt}(t_{0i})}. \quad (8)$$

Значения  $L_1$ , определенные по (8), не зависят ни от суммарного емкостного тока сети  $I_{c\Sigma}$ , ни от активных потерь в контуре тока ОЗЗ, т.е. и от  $R_{\Pi}$ .

Таким образом, используя в качестве информационных параметров мгновенные значения переходного напряжения на поврежденной фазе  $u_A(t)$  и производной переходного тока  $i_0(t)$ , измеренные в моменты перехода последнего через нулевое значение, можно обеспечить независимость измерений расстояния до места ОЗЗ от основных влияющих факторов – суммарного емкостного тока сети  $I_{c\Sigma}$  и активных потерь в контуре тока ОЗЗ. Преимуществами данного метода ОМЗЗ является также отсутствие необходимости в нормировании измеренных величин.

#### Литература

1. **Файбисович Д.Л., Карапетян И.Г., Шапиро И.М.** Справочник по проектированию электрических сетей – М.: НЦ ЭНАС, 2012. – 376 с.
2. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
3. **Шуин В.А.** Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электричество. – 1991, № 10. – С. 58-61.

## АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

<b>А</b>		ДОБРЯГИНА О.А.	299
АББЯСОВ А. М.	107	ДРЯЗГОВ Д.Е.	176
АГАПОВ В.А.	110		
АЛЕКСАНДРОВ В.П.	82, 86	<b>Е</b>	
АЛЬШУАЙЛИ АЛИ	249	ЕГОРОВ В.Н.	77, 82, 86
АНДРЕЕВ М.О.	291	ЕГОРЫЧЕВА Е.В.	31, 34
АНИСИМОВ А.А.	98	ЕЛИЗАРОВА Н.Н.	41
АНИСИМОВ С.В.	26	ЕРЕМИН И.В.	185
АПОЛОНСКИЙ В.В.	74		
АРЕФЬЕВ И.М.	208	<b>З</b>	
		ЗАРУБИН В.П.	278
<b>Б</b>		ЗАРУБИНА Е.В.	242
БАЛМАСОВ А.В.	255	ЗАХАРОВ А.В.	127
БЕЗГИН А.С.	154	ЗАХАРОВ М.А.	57
БЕЛЯЕВА А.В.	122	ЗАХАРОВ П.А.	57
БУЛАТОВ Л.Н.	3	ЗВОЛИНСКАЯ А.Р.	239
		ЗУЙКОВ В.А.	12
<b>В</b>			
ВЕДЕРНИКОВА И.И.	258, 271	<b>И</b>	
ВИНОГРАДОВ А.Б.	64, 67	ИВАНОВ Н.С.	114
ВИНОГРАДОВА Е.В.	242	ИЗОТОВ А.И.	144, 148
ВЛАСОВ В.М.	274	ИЗОТОВ С.А.	144
ВОЛКОВА М.Ю.	31, 34	ИЛЬИНА Е.Э.	236
ВОЛЫНКИН О.Н.	242		
ВОРОБЬЕВА Е.А.	299, 302	<b>К</b>	
ВУКОЛОВ В.Ю.	296	КАЗАКОВ Ю.Б.	159, 162, 166 214
		КАЙЗЕР Д.Д.	20
<b>Г</b>		КАЙЗЕР М.Д.	20
ГАЛДИН А.Ю.	127	КАПУСТИН С.А.	89, 92
ГАМИДОВ П. И.	77	КАРАНДАШЕВ А.П.	110
ГВОЗДЕВА Т.В.	41	КАРАУЛОВ В.Н.,	173
ГНЕЗДОВ Н.Е.	48	КАТАНАЕВ А.Ю.	12
ГОЛЯС А.А.	252, 268	КИСЕЛЕВ А.А.	284
ГОРБУНОВ А.А.	281	КИСЕЛЕВ В.В.	278
ГРАЧЕВ П.Ю.	133	КИСЕЛЕВ Д.С.	51, 54
ГРЕКОВ Э.Л.	154	КОБЕЛЕВ А.С.	118, 122
ГУРФОВА О.М.	15	КОВАЛЕВ К.Л.	114
ГУСЕВ А.С.	148	КОЛГАНОВ А.Р.	48
ГУСЕНКОВ А.В.	195	КОЛЕСНИКОВ А.А.	296
		КОЛОБОВ А.Б.	227, 230
<b>Д</b>		КОЛОТИЛОВ А.К.	224
ДЕМИДОВА С.А.	6	КОМЛЕВ Д.М.	188
ДЕМЬЯНЦЕВА Н.Г.	255	КОНДИРОВА С.В.	74
ДМИТРИЕВСКИЙ В.А.	138	КОРМУШКИН А.С.	288
ДОБРОХОТОВ А.А.	60		

КОРНЕВ И.А.	198	ПЕКУНОВ В.В.	44
КОРНИЛОВ Д.С.	159	ПИРОГОВ Д.А.	224
КОРОТКОВ А.А.	64, 67	ПОДОБНЫЙ А.В.	188
КОСЯКОВ С.В.	6, 20	ПОКРОВСКИЙ А.А.	278
КОХАНЧУК Н.Д.	148	ПОЛЕТАЕВ В.А.	252, 261, 268
КРАЙНОВА Л.Н.	249		274
КУЗНЕЦОВ М.А.	28	ПОПОВ Г.В.	185
КУЗЬМИН С.М.	255	ПРАХТ В.А.	138
КУЛИКОВ А.Л.	296	ПРОКОШЕВ Д.К.	148
КУРНЫШЕВ Б.С.	51, 54	ПУЧКОВ П.В.	278
КУРЫЛИН Е.Ю.	89		
		<b>Р</b>	
<b>Л</b>		РАССОЛОВ С.Е.	208
ЛАПОЧКИН А.И.	37	РАТМАНОВА И.Д.	15
ЛЕБЕДЕВ В.Д.	288	РОДИОНОВ Р.В.	130
ЛЕБЕДЕВ С.К.	48	РЯБЦОВ И.Н.	70
ЛИХАЧЕВА А.В.	205	РЯБЧИКОВ А.Ю.	281
<b>М</b>		<b>С</b>	
МАКАРОВ Д.Ю.	217	САБАНЕЕВ Н.А.	239
МАСЛИХИН В.А.	130	САДЫКОВ А.М.	20
МАСЛОВ Л.Б.	221	САЛИКОВ М.П.	154
МИЛОСЕРДОВ Е.П.	28	САФИН Н.Р.	138
МОРОЗОВ А.Н.	166	САХАРОВ М.В.	173
МОРОЗОВ Н.А.	176, 214, 217	СЕВРЮГОВ Д.М.	202
МОШКИН И.А.	98	СЕЛЕЗНЕВ С.В.	224
МУКУЧЯН А.А.	28	СЕМЕНОВА К.В.	192
МУНИЦЫН А.И.	249	СЕНИН Д.С.	3
		СЕРГУНИН Н.А.	37
<b>Н</b>		СИБИРЦЕВ М.А.	64, 67
НЕСТЕРОВ С.А.	214	СИДОРОВ А.А.	37
НИКИТИН К.А.	114	СКИТОВИЧ С.В.	127
НИКУЛИН С.В.	148	СКОВОРОДА Б.Ф.	24
НОВОСЕЛЬЦЕВ И.И.	9	СМИРНОВ И.С.	12
НОВОСЕЛЬЦЕВА С.С.	9	СОБОЛЕВ Д.В.	144
НОЗДРИН М.А.	236, 239	СОЛДАТОВ И.Н.	246
		СОЛОВЬЕВ И.В.	101
<b>О</b>		СОЛОМАНИЧЕВ М.А.	51, 54
ОГУРЦОВ Ф.Б.	227, 230	СПИЧКОВ Ю.П.	70
ОКЕАНСКИЙ А.П.	166	СТРАДОМСКИЙ Ю.И.	208, 211
ОРЛОВ А.С.	265	СТУЛОВ А.В.	182
<b>П</b>		<b>Т</b>	
ПАВЛЮКОВА Н.Л.	265	ТАБАЧИНСКИЙ А.С.	133
ПАЙКОВ И.А.	192	ТАМЬЯРОВА М.В.	195, 198
ПАНТЕЛЕЕВ Е.Р.	12	ТЕРЕХОВ А.И.	101
ПАХОЛКОВА Т.А.	274	ТЕРЕХОВ В.Г.	79

ТИМОШЕНКО В.Н. 144  
ТИХОМИРОВА И.А. 24, 92  
ТИХОНОВ А.И. 182, 185, 188,  
192, 195, 198,  
202, 205  
ТОМИН Н.Г. 221  
ТОПОРОВ А.В. 278  
ТРОФИМОВИЧ И.А. 182

**У**

УТЮГОВА А.А. 268

**Ф**

ФИЛАТОВ Ю.Е. 233  
ФИЛАТОВА Г.А. 288  
ФИЛАТОВА Г.А. 302  
ФИЛИППОВ В.А. 211  
ФОМИНА О.В. 20  
ФОМИНЫХ А.А. 144  
ФОМИНЫХ А.А. 148  
ФРОЛОВА О.В. 291

**Х**

ХОРИКОВ А.А. 296

**Ч**

ЧЕРНОВ Л.К. 261  
ЧИСТОСЕРДОВ В.Л. 64, 67  
ЧУБАРОВ А.А. 281

**Ш**

ШАДРИКОВА Т.Ю. 299  
ШВЕЦОВ Н.К. 162  
ШИРЯЕВ А.Н. 60  
ШИШКИН В.П. 169  
ШЛЯПУГИН Р.В. 224  
ШМЕЛЕВА Т.В. 242  
ШПЕНЬКОВА Е.В. 252  
ШУИН В.А. 299  
ШУРЫГИН А.М. 179  
ШУРЫГИН М.Н. 179

**Я**

ЯМАНСАРИН И.И. 154

## СОДЕРЖАНИЕ

Секция 3. "ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ".....	3
Секция 7. "МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И УСТАНОВКАМИ" .....	48
Секция 8. "МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ" .....	74
Секция 10. "ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА" .....	114
Секция 11. "ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ" .....	221
Секция 13. "ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ" .....	252
Секция 19. "РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ" .....	288

**МАТЕРИАЛЫ**  
Международной научно-технической конференции  
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**  
(XIX Бенардосовские чтения)  
*посвящёна 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса*

*Печатаются в авторской редакции*

III том  
**Электротехника**

Подписано в печать 27.04.2017. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 18,13. Уч.-изд. л. 19,60. Тираж 30 экз. Заказ .  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Типография ООО «ПресСто»  
153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39