

Министерство науки и высшего образования 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»**

(XXIII Бенардосовские чтения)

*посвящается 80-летию
Российской атомной промышленности*

29–31 мая 2025 г.

III том
Электротехника

Иваново 2025

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:

Ледуховский Г.В., д.т.н., профессор – председатель;
Тютиков В.В., д.т.н., профессор;
Шуин В.А., д.т.н., профессор;
Казakov Ю.Б., д.т.н., профессор;
Косяков С.В., д.т.н., профессор;
Бухмиров В.В., д.т.н., профессор;
Колганов А.Р., д.т.н., профессор;
Бушуев Е.Н., д.т.н., доцент;
Колибаба В.И., д.э.н., профессор;
Карякин А.М., д.э.н., профессор;
Клюнина С.В., начальник УИУНП.

По материалам Международной научно-технической конференции
«Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии»
(XXIII Бенардосовские чтения) будет выпущен электронный сборник научных
трудов, который будет размещен в научной электронной библиотеке
на eLIBRARY.RU договор № 1042-03/2015К

посвящается 80-летию Российской атомной промышленности

ISBN 978-5-00062-671-9
ISBN 978-5-00062-668-9 (Т. 3)

© ФГБОУВО «Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина», 2025.

СЕКЦИЯ 3.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.272::004.432::004.94

В.В. ПЕКУНОВ, д.т.н., инженер

ОАО «Информатика»
153000, г.Иваново, ул.Ташкентская, 90
E-mail: pekunov@mail.ru

Оптимальная балансировка загрузки CPU+GPU при расчете химической кинетики в задачах механики сплошной среды на языке Planning C

Аннотация. Рассматривается проблема балансировки загрузки CPU+GPU в локально-узловых расчетах. Доля загрузки задается экспертом или регулируется градиентным методом. Описаны синтаксические средства векторизации циклов на CPU+GPU с такой балансировкой, включенные в язык Planning C. Апробация подхода на сложной расчетной задаче показала его эффективность.

Ключевые слова: CPU, GPU, распараллеливание, химическая кинетика, балансировка загрузки, механика сплошной среды, Planning C

V.V. PEKUNOV, Doctor of Engineering, engineer

JSC «Informatika»
153000, Ivanovo, Tashkentskaya st., 90
E-mail: pekunov@mail.ru

Optimal Load Balancing of CPU+GPU in Chemical Kinetics Calculations in Continuous Media Simulation Using Planning C Language

Abstract. The problem of balancing the CPU+GPU load in local-node calculations is considered. The share of the load is set by an expert or regulated by a gradient method. Syntactic constructions of vectorization of cycles on CPU+GPU with such balancing, included in the Planning C language, are described. Testing the approach on a complex calculation problem showed its effectiveness.

Key words: CPU, GPU, parallelizing, chemical kinetics, load balancing, continuous media mechanics tasks, Planning C

Численное моделирование процессов механики сплошной среды (с распараллеливанием по пространству) при наличии локально-узловых (например, химико-кинетических) расчетов, различающихся по времени исполнения от узла к узлу, требует балансировки загрузки процессорных ядер путем перераспределения локально-узловых расчетов.

Автором предлагались подходы к балансировке загрузки при локально-узловых расчетах химической кинетики на одиночном вычислителе (CPU [1] или CPU/GPU [2]). Совместное использование CPU+GPU возможно на базе подхода [2], но требует дополнительной балансировки, связанной с различной вычислительной мощностью CPU и GPU.

Целью работы является повышение эффективности параллельного численного решения (на системе CPU+GPU) задач механики сплошной среды с локально-узловыми расчетами по типу химико-кинетических.

Поставим задачи: а) предложить решение проблемы балансировки загрузки CPU+GPU при локально-узловых расчетах; б) предложить синтаксические средства языка Planning C, позволяющие эффективно применить балансировку загрузки для векторизуемых циклов; в) провести апробацию подхода на сложной задаче моделирования.

Для априорного распределения нагрузки CPU перед итерацией можно использовать величины какой-либо временной характеристики исполнения предыдущей итерации в отдельных узлах, это оправданно для задач с медленным «дрейфом» областей с повышенным временем счета. Такой подход можно распространить и на GPU, учитывая, что для наиболее эффективной работы каждого мультипроцессора, необходимо распределить ему узлы расчетной сетки с предполагаемо наиболее схожими трассами исполнения. Схожие трассы можно выявить сортировкой по ключу «характеристика времени исполнения + трасса».

При совместной работе CPU+GPU возникает проблема балансировки – выравнивания времени счета на CPU и GPU, которое можно свести к определению долей загрузки графического процессора k и центрального процессора $(1-k)$. При этом N узлов расчетной сетки сортируются по убыванию величины характеристики времени исполнения, а для ее близких величин – по убыванию схожести трасс. При отправке задания на GPU максимально снизим как объем задания, так и дивергентность потоков задания. Для этого отправим на GPU первые $k \cdot N$ узлов из отсортированного множества (они трудозатратнее, поэтому их будет меньше, чем на CPU, а схожесть трасс в таких узлах будет выше, чем в узлах из конца множества), а оставшиеся узлы обработаем на CPU.

Зададим начальное k ($k_{\text{prev}} := k_{\text{cur}} := k$). Для каждой итерации найдем k , при котором эмпирическое время счета $T(k, t)$ будет близким к минимальному в данный момент t . Применим вариант градиентного метода. Имеем последние $T_{\text{cur}} = T(k_{\text{cur}}, t_{\text{cur}})$ и предпоследние замеры $T_{\text{prev}} = T(k_{\text{prev}}, t_{\text{prev}})$, тогда алгоритм подстройки k после итерации:

1. Если $|k_{\text{cur}} - k_{\text{prev}}| < \varepsilon$, то переходим к шагу 1.1, иначе к шагу 1.2.

1.1. Профилактика «вырождения». Если $k < 0,5$, то $k := k + \delta$, иначе $k := k - \delta$. Переходим к шагу 2.

1.2. Подстройка в соответствии с антиградиентом.

$$k := k - \alpha \frac{T_{\text{cur}} - T_{\text{prev}}}{K_{\text{cur}} - K_{\text{prev}}}. \text{ Переходим к шагу 2.}$$

2. Полученное новое значение k проверяется на принадлежность диапазону $[0; 1]$ с возможной коррекцией (присваиванием соответствующих граничных значений при их нарушении).

3. Присваивания: $T_{\text{prev}} := T_{\text{cur}}; K_{\text{prev}} := K_{\text{cur}}; k_{\text{cur}} := k; t_{\text{prev}} = t_{\text{cur}}.$

Здесь ε, δ – малые величины, α – параметр градиентного метода.

В языке Planning C существует понятие автоматически векторизуемого на GPU цикла с балансировкой загрузки по алгоритму [2]:

vectorized<...> gpu<...> цикл

с выделением **_pivot**-переменной, выступающей в роли универсальной характеристики времени исполнения алгоритма. Такой цикл вводится или вручную, или специальной программой-параллелизатором.

Пусть такой цикл может выполняться параллельно на GPU и CPU в соответствии с модифицированным алгоритмом балансировки. Тогда базовая конструкция цикла будет предваряться еще одним предикатом **optimized(k)** или **optimized(auto[,начальное k])**. Первый вид предиката подразумевает явное указание константной доли k , второй – ее автоматическую подстройку с указанием начального значения k , отсутствие предиката означает исполнение цикла полностью на GPU.

Апробируем предложенный подход при решении задачи трехмерного моделирования образования и динамики водно-пылевого облака, поглощающего продукты горения метана и диоксид серы. Использовался один компьютер (Yandex Compute Cloud) с процессором Intel Xeon, 2 ГГц, 8 ядер, и с видеокартой NVidia Tesla V100 32 Gb (5120 ядер, 1530 МГц). Применялись: векторизация цикла на Planning C; OpenMP.

Результаты решения указанной задачи даны в табл. 1.

Таблица 1. **Результаты вычислительных экспериментов**

Начальное значение k	Подстройка k	Время счета химической кинетики, с	Общее время счета, с
Непараллельный расчет	-	103	619,4
0 (CPU, расчет без GPU)	Отсутствует	70	412
1 (GPU, расчет без CPU)	Отсутствует	81,7	423,5
0,4 (CPU+GPU)	Отсутствует	51	396
Не задавалось, CPU+GPU	Автоматическая	64	405,8

Таким образом: а) распараллеливание дало ощутимое ускорение; б) результаты с совместным использованием CPU+GPU дали лучшие результаты по времени, чем для только CPU или только GPU; в) применение автоматической подстройки k дало несколько худший результат по

времени, чем при жестко заданном экспертом k , но этот результат лучше, чем в экспериментах с граничными значениями k . Поэтому, если априорно установить оптимальное значение k невозможно, автоматическая подстройка является достаточно эффективным вариантом.

Литература

1. Пекунов В.В. Новые методы параллельного моделирования распространения загрязнений в окрестности промышленных и муниципальных объектов // Дис. докт. тех. наук. - Иваново, 2009. - 274 с.

2. Пекунов В.В. Балансировка загрузки устройств SIMT-архитектуры в расчете химической кинетики при наличии расходящихся трасс потоков. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=38472

УДК 004.6

И.Д. РАТМАНОВА, д.т.н., профессор,
Л.М. ЗОНИН, аспирант

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

Разработка сервиса для анализа топливно-энергетических балансов региона

Аннотация. В работе приведено описание разработанного веб приложения для комплексной работы с показателями топливно-энергетических балансов региона. Сервис написан на Python с использованием микро-фреймворка Flask.

Ключевые слова: топливно-энергетический баланс, веб-приложение, Python, Flask

I.D.RATMANOVA, Doctor of Engineering, professor
I.M. ZONIN, aspirant

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

Development of a service for analyzing fuel and energy balances of the region

Abstract. The paper provides a description of the developed web application for integrated work with regional fuel and energy balances. The service is written in Python using the Flask micro-framework.

Key words: fuel and energy balance, web application, Python, Flask

Современные вызовы в области управления топливно-энергетическими ресурсами требуют новых подходов к анализу и оптими-

зации энергопотребления на региональном уровне. Сервис "RegionBalance" разработан для поддержки принятия решений по повышению эффективности использования ТЭР. Его основные задачи:

- Оценка эффективности энергопотребления с лингвистической интерпретацией результатов;
- Формирование когнитивных образов на основе показателей ТЭБ;
- Подготовка аналитических отчетов.

Сервис "RegionBalance" реализован как веб-приложение на базе микрофреймворка Flask, что обеспечивает модульную архитектуру и четкую файловую структуру. На рис. 1 отображена структура Flask-приложения.

```

/app_dir
  /region-balance
    /static
      /css
        style.css
      /templates
        index.html
    /downloads
    /uploads
    app.py
    requirements.txt

```

Рис. 1. Структура приложения

Корневой каталог /app_dir содержит все файлы проекта. В директории /region-balance находится исходный код, включая:

- /static – статические файлы (CSS, JavaScript), в том числе подкаталог /css с файлом style.css для стилизации интерфейса;
- /templates – HTML-шаблоны (например, index.html), генерируемые через Jinja2;
- /downloads – файлы для скачивания пользователями;
- /uploads – загруженные файлы (Excel).

Файл app.py – основа Flask-приложения, включает маршруты, логику обработки запросов, подключение шаблонов и работу с файлами. Зависимости (Flask, Plotly, Pandas и др.) указаны в requirements.txt для развертывания на сервере.

Маршруты в веб-приложении связывают URL с функциями обработки запросов, обеспечивая распознавание запросов, структурирование кода, динамическую генерацию контента и контроль доступа. Ключевые маршруты приложения:

- Главная страница ("/"): отображает список файлов из директории UPLOAD_FOLDER.

- Скачивание шаблона ('/download-template'): предоставляет файл template.xlsm для загрузки.
- Загрузка файлов ('/upload'): принимает POST-запросы, проверяет и сохраняет файлы в UPLOAD_FOLDER.
- Удаление файлов ('/delete_files'): очищает директорию UPLOAD_FOLDER.
- Отображение отчета ('/display-report'): анализирует базовый и текущий файлы, генерирует отчет и графики с помощью Plotly.

Маршруты упрощают взаимодействие пользователя с системой, обеспечивая структурированность и безопасность.

Приложение развернуто на виртуальном сервере с использованием WSGI-сервера Waitress для стабильной работы и Nginx как обратного прокси для безопасности и маршрутизации. Доступ осуществляется через домен region-balance.ru.

Пользователи могут загружать данные в формате Excel, обрабатывать их и получать аналитические отчеты с визуализацией. Сервис поддерживает интерактивные диаграммы [1], созданные с помощью библиотеки Plotly:

- Диаграммы Sankey;
- Параллельные координаты;
- Тепловые карты;
- Диаграммы потоков;
- Радарные диаграммы.

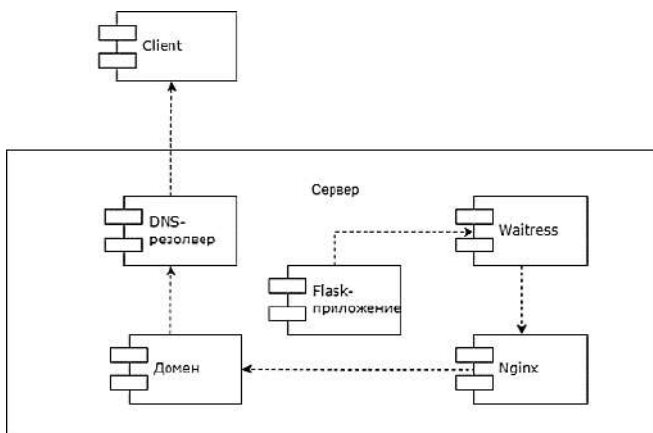


Рис. 2. Диаграмма компонент приложения

Для оценки энергоэффективности применен подход, преобразующий числовые показатели индикаторов эффективности ТЭБ в качественные

категории ("Плохо", "Есть улучшение" и т.д.) с использованием метода оценки динамики изменения энергопотребления, в основу которого положена теория нечетких множеств [2]. Это упрощает интерпретацию результатов.

Сервис "RegionBalance" предоставляет эффективное решение для анализа энергопотребления в регионе через Интернет. Он автоматизирует формирование ТЭБ, накапливает данные, оценивает эффективность и визуализирует результаты, поддерживая принятие управленческих решений.

Использование Python и Flask обеспечивает:

- Быструю разработку и гибкость благодаря простоте синтаксиса и модульной архитектуре;
- Мощные возможности анализа и визуализации за счет библиотек Pandas и Plotly;
- Удобство поддержки и масштабируемость для будущих доработок;
- Сервис упрощает работу с данными ТЭБ.

Литература

1. Ратманова И. Д., Зонин Л. М. Использование когнитивной графики для анализа показателей топливно-энергетического баланса региона // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения. Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции. Казань. 2024. С. 424-428.

2. Ратманова И. Д., Зонин Л. М. Методы и средства оценки эффективности энергопотребления на основе ретроспективного анализа показателей топливно-энергетических балансов региона // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. - №7. С. 192-198.

УДК 004.032.26

К.В. ЛЮДИН, аспирант,
Е.Р. ПАНТЕЛЕЕВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: kirillyudin@gmail.com

Оптимизация структуры и параметров обучения нейросетевой модели методом двухэтапного экстремального эксперимента

Аннотация. В работе предложен метод оптимизации архитектуры нейросети U-Net для определения положения зрачка в реальном времени. Декомпозиция задачи на два этапа (сначала подбор оптимального количества слоёв и фильтров, затем эпох) позволила сократить вычислительные затраты. Оптимальная конфигурация (3 слоя кодеров и декодеров, максимальное количество фильтров, равное 128, 10 эпох) при скорости обработки менее 1/24 сек обеспечивает точность по коэффициенту Дайса, равную 0,87. Результаты исследования могут быть приме-

нены в медицине, при разработке систем слежения за вниманием пользователя, а также для управления приложениями.

Ключевые слова: нейросеть, распознавание, сегментация, коэффициент Дайса, экстремальный эксперимент

K.V. LYUDIN, student,
E.R. PANTELEEV, Doctor of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University
34, Rabfakovskaya St., 153003, Ivanovo
E-mail: kirillyudin@gmail.com

Optimization of the structure and training parameters of a neural network model using a two-stage extreme experiment method

Abstract. The study proposes a method for optimizing the architecture of a U-Net neural network for real-time pupil localization. By decomposing the task into two stages (first selecting the optimal number of layers and filters, then determining the epochs), computational costs were reduced. The optimal configuration (3 encoder and decoder layers, a maximum of 128 filters, and 10 epochs) achieves a processing speed of less than 1/24 of a second with a Dice similarity coefficient of 0.87. The research findings can be applied in medicine, the development of user attention-tracking systems, and application control.

Key words: neural network, recognition, segmentation, Dice similarity coefficient, extreme experiment

Введение. Актуальной задачей в области компьютерного зрения является определение положения зрачка. Проблема заключается в обеспечении необходимой точности идентификации положения зрачка в режиме реального времени с ограничениями на аппаратную конфигурацию компьютера, в частности, использование IP-камеры.

Метрикой точности служит коэффициент Дайса (значение должно быть не менее 0,8 [2]), метрикой производительности – скорость обработки изображения (не должна превышать 1/24 сек).

Анализ существующих подходов. В докладе приведено подробное обоснование выбора аппарата нейронных сетей в качестве инструмента решаемой задачи.

Используемый метод оптимизации. Для оптимизации нейросети использовался метод экстремального эксперимента с варьированием количества слоёв кодеров/декодеров модели, фильтров и эпох обучения [1]. Проблема прямого применения данного метода с изменением всех параметров состоит в значительных вычислительных затратах на проведение опытов (для каждой точки требуется проведение 8 опытов, каждый из которых длится не менее 10 мин).

Поэтому авторами предложена гипотеза о возможности декомпозиции оптимизационного процесса на два этапа: оптимизация количества слоёв и фильтров (1 этап) и оптимизация количества эпох обучения (2 этап). В докладе приведено теоретическое обоснование этой гипотезы на базе

методов регрессионного анализа. Для статистической обработки результатов полного факторного эксперимента использовался пакет statsmodels языка Python. Декомпозиция оптимизационного процесса обеспечивает двукратную экономию времени на каждой итерации эксперимента.

Для определения значимых переменных был использован метод прямого включения параметров. В качестве критерия качества модели принято наименьшее р-значение среди добавляемых параметров, а в качестве критерия останова – р-значение, равное 0,05. Данный метод показал, что значимыми параметрами являются свободный член, количество слоёв и максимальное количество фильтров. Уравнение принимает следующий вид:

$$f(x, y) = -0,0507 \cdot x + 0,0893 \cdot y + 0,8555, \quad (1)$$

где x – количество слоёв, y – двоичный логарифм количества фильтров.

В результате исследования было подтверждено, что влияние количества эпох на другие факторы не является существенным.

Результаты и их анализ. На основании подтвержденной гипотезы был поставлен двухэтапный экстремальный эксперимент. Варьирование количества слоев и фильтров на первом этапе показало, что оптимальная конфигурация модели содержит 3 слоя и максимальное количество фильтров, равное 128.

На втором этапе оптимизации был поставлен экстремальный эксперимент с варьированием количества эпох при фиксированном значении слоёв и фильтров. Эксперимент показал, что оптимальное количество эпох обучения модели равно 10. Процесс сходимости итерационного процесса демонстрирует иллюстрационный материал доклада.

С целью верификации результатов оптимизации был проведён эксперимент с варьированием всех параметров в окрестностях центральной точки (3;7;10). Данные эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Опыты в окрестностях центральной точки (3; 7; 10)**

№ опыта	Кол-во слоёв	Двоичный логарифм кол-ва фильтров	Кол-во эпох	Коэффициент Дайса
1	4	7	10	0,8264
2	2	7	10	0,9036
3	3	8	10	0,9336
4	3	6	10	0,7605
5	3	7	11	0,8808
6	3	7	9	0,8616
7	4	8	10	0,9017
8	2	6	10	0,8389

Уравнение аппроксимирующей поверхности в окрестностях центральной точки (3; 7; 10) принимает следующий вид:

$$f(x, y, z) = -0,0441 \cdot x + 0,081 \cdot y + 0,0096 \cdot z + 0,3325, \quad (2)$$

где x – количество слоёв, y – двоичный логарифм количества фильтров, z – количество эпох.

Модуль градиента в данной точке равен 0,0928, что меньше заданного на первом этапе оптимизации уровня точности, равного 0,1, что подтверждает оптимальность полученной конфигурации.

Таким образом, оптимизированная архитектура U-Net включает в себя 3 слоя, 128 фильтров и 10 эпох обучения. Модель обеспечивает достаточную точность (коэффициент Дайса равен 0,87) при соответствии ограничению по производительности.

Выводы. Предложен, обоснован и подтвержден экспериментально метод двухэтапной оптимизации конфигурации нейросети, применение которого позволяет уменьшить временные затраты на оптимизацию без потери качества результата. Достоверность результатов подтверждается использованием общенаучного метода экстремального эксперимента, а его модификация была теоретически обоснована корректным использованием методов математической статистики. Результаты работы могут быть полезны в медицинской диагностике, системах отслеживания внимания и управлении приложениями.

Литература

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский / Москва: Наука, 1976. 278 с.
2. Brock K. K., Mutc S., McNutt T. R., Li H., Kessler M. L. Use of image registration and fusion algorithms and techniques in radiotherapy: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 132 // Medical physics, 44(7). 2017. Pp. e43–e76 – [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1002/mp.12256>.

УДК 004.5: 37.026.3

А.С. СОКОЛОВА, аспирант,
Н.Н. ЕЛИЗАРОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: anncokolova15836@mail.ru, madam.n.elizarova2014@yandex.ru

Подходы к формированию цифрового контента в образовательных системах

Аннотация. В связи с быстрыми темпами развития информационных технологий цифровизация образования стала важной тенденцией современности. Для повышения качества и эффективности учебной деятельности необходимо интегрировать традиционные методы обучения с современными цифровыми инструментами. В работе рассматриваются вопросы интеграции цифровых ресурсов в учебные программы, обеспечения доступности и адаптивности контента.

Ключевые слова: обучение, цифровой контент, адаптация учебного материала, человеко-машинное взаимодействие.

A.S. SOKOLOVA, postgraduate student,
N.N. ELIZAROVA Candidate of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskay St., 34
E-mail: anncokolova15836@mail.ru, madam.n.elizarova2014@yandex.ru

Approaches to the formation of digital content in educational systems

Abstract. Due to the rapid development of information technology, digitalization of education has become an important trend of our time. To improve the quality and effectiveness of educational activities, it is necessary to integrate traditional teaching methods with modern digital tools. The paper considers the issues of integrating digital resources into curricula, ensuring accessibility and adaptability of content.

Key words: training, digital content, adaptation of educational material, human-machine interaction.

Современные образовательные системы характеризуются интенсивной цифровизацией всех уровней и сфер учебного процесса. Цифровой контент активно внедряется в образовательные практики, открывая новые горизонты для участников учебного процесса. Несмотря на многочисленные преимущества, процесс создания и внедрения цифрового контента сопровождается множеством трудностей, требующих комплексного анализа и осмысления.

Цель статьи заключается в исследовании подходов к формированию цифрового контента в образовательных системах, выявлении ключевых проблем и перспектив развития в данном направлении.

В работе Ткачук О.А. [1] рассмотрены основные подходы к формированию цифрового контента:

Педагогический подход

Создание цифрового контента требует соблюдения методологии обучения. Ключевыми аспектами педагогического подхода являются соответствие содержания установленным образовательным стандартам, учет возрастных особенностей обучающихся, междисциплинарность и интеграция различных видов деятельности.

1. **Адаптация учебных материалов:** цифровой контент должен соответствовать уровню подготовки учащихся и учитывать особенности изучаемых предметов. Использование интерактивных элементов и мультимедийных объектов повышает мотивацию и вовлеченность студентов.

2. **Личностно-ориентированное обучение:** индивидуализация обучения, основанная на интересах и способностях учеников, делает образовательный процесс более эффективным.

3. **Междисциплинарность:** интеграция знаний из различных научных дисциплин способствует развитию критического мышления и формированию целостного представления о мире.

Технологический подход

Технологическая составляющая цифрового контента подразумевает выбор инструментов и платформ для его разработки и распространения. Современные информационные технологии позволяют создавать различные форматы учебных материалов, начиная от электронных учебников и заканчивая виртуальными лабораториями и симуляторами.

1. **Системы управления обучением (LMS):** использование платформ, таких как Moodle, Canvas или Blackboard, обеспечивает централизованное хранение и управление цифровыми ресурсами.

2. **Интерактивные технологии:** применение VR/AR-технологий значительно расширяет возможности визуализации и моделирования сложных процессов.

3. **Открытые образовательные ресурсы (OER):** бесплатные и открытые образовательные ресурсы обеспечивают широкий доступ к знаниям и снижают затраты на создание нового контента.

Организационный подход

Организационный подход затрагивает вопросы планирования, координации и управления процессом создания и внедрения цифрового контента. Необходимо обеспечить эффективное взаимодействие всех участников образовательного процесса – преподавателей, разработчиков, администраторов и студентов.

1. **Командная работа:** координация усилий специалистов разного профиля (преподавателей, программистов, дизайнеров) важна для успешной разработки высококачественного контента.

2. **Мониторинг и оценка:** постоянный контроль и оценка эффективности цифровых ресурсов помогают оперативно вносить необходимые изменения и повышать качество обучения.

3. **Обратная связь:** участие студентов в оценке и улучшении цифрового контента способствует его дальнейшей адаптации под конкретные нужды аудитории.

Цифровой контент играет важную роль в обновлении содержания образовательной деятельности в системе профессионального образования, он обеспечивает [2]:

1. **Расширение доступа к образованию:** цифровой контент позволяет учащимся получать знания независимо от их местоположения и временных ограничений, что особенно актуально для профессионального образования, где студенты часто совмещают учебу с работой.

2. **Повышение качества образования:** благодаря интерактивным элементам и мультимедийным объектам, цифровой контент делает обучение более увлекательным и эффективным, повышая мотивацию и вовлеченность студентов.

3. **Адаптивность и персонализация:** цифровой контент позволяет адаптировать учебные материалы под индивидуальные потребности и способности учащихся, что особенно важно в профессиональном образовании, где учащиеся могут иметь разный уровень подготовки и опыта.

4. **Возможности для самообразования:** студенты имеют возможность самостоятельно изучать материалы, выбирать удобное время и место для занятий, что способствует развитию самостоятельности и ответственности.

5. **Инновационность и актуальность:** цифровой контент позволяет быстро обновлять учебные материалы, учитывая последние достижения науки и техники, что крайне важно для профессиональной подготовки специалистов.

Таким образом, современные технологии адаптации материалов и использование цифрового контента, играет ключевую роль в обновлении содержания образовательной деятельности и повышении её качества и эффективности. Формирование цифрового контента в образовательных системах представляет собой многогранный процесс, включающий разные аспекты. Комплексный подход к разработке и внедрению цифровых ресурсов будет способствовать улучшению качества образования и созданию условий для эффективного обучения в эпоху цифровизации. В дальнейшем планируется изучение влияния цифрового контента на результаты обучения, разработка методики оценки его эффективности и совершенствовании механизмов обратной связи с пользователями.

Литература

1. Ткачук, О. А. Роль цифрового контента в обновлении содержания образовательной деятельности в системе профессионального образования / О.А. Ткачук // Векторы взаимодействия: СПО–вуз–предприятие. Екатеринбург; Первоуральск: РГППУ, 2023. С. 133–138.

2. Бужинская Н.В. Информационно-коммуникационные технологии как средство организации практико-ориентированного обучения // Наука и перспективы. 2016. № 1. С. 26–30.

УДК 621.372.22

С.В. ПЕТРОВСКИЙ, к.т.н.

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: petrovski@rambler.ru

Работа бортового комплекса диагностики при анализе электромагнитной совместимости системы зажигания автомобиля

Аннотация. В статье рассматривается бортовой комплекс диагностики, который дает возможность оценить превышение уровня электромагнитных помех от

системы зажигания автомобиля с другим электрооборудованием, при помощи встроенных в комплекс интеллектуальных датчиков.

Ключевые слова: система зажигания, интеллектуальные датчики, диагностика, электромагнитные помехи, бортовой комплекс диагностики.

S.V. PETROVSKI, PH.D.

Samara State Technical University,
443100, Samara, st. Molodogvardeiskaya, 244
E-mail: petrovski@rambler.ru

Operation of the on-board diagnostic system during the analysis of electromagnetic compatibility of the vehicle ignition system

Abstract. The article discusses an on-board diagnostic system that makes it possible to assess the excess of electromagnetic interference from the vehicle ignition system with other electrical equipment, using smart sensors built into the system.

Key words: ignition system, intelligent sensors, diagnostics, electromagnetic interference, on-board diagnostic system.

При анализе экспериментальных возможностей бортового комплекса диагностики были выделены следующие шесть факторов, критерием отбора которых явилось наличие диагностических данных, показывающих их воздействие на ЭМС электрооборудования [5, 6]:

- пробег автотранспортного средства (500...140000 км);
- тип катушки зажигания («Новосибирск», «Север», «Москва» и МЗАТЭ-2);
- тип топлива (бензин, природный газ);
- обороты двигателя (500...2000 об/мин);
- угол опережения зажигания (8...32°);
- тип высоковольтных проводов (ВВП) (с активным и комплексным сопротивлением).

При анализе вышеуказанных данных для каждого из этих факторов были измерены спектральные распределения напряжённости электромагнитных помех (E , дБ (мкВ/м)), представляющие собой диагностические базы данных, для анализа с помощью интеллектуальных датчиков. Однако, эти спектральные распределения не могут быть непосредственно проанализированы ИД – на их основе формируются вторичные переменные (ВП) ($S_j, j \in \overline{1, m}$), производящие выборку значений напряженности ЭМП, E , на диагностических интервалах варьирующей продолжительности $w_k, k \in \overline{1, l}$ [2, 4].

На рис. 1 показаны диагностические данные, соответствующие допустимому и недопустимому уровню электромагнитных помех (ЭМП) при рассмотрении их спектральных распределений, характеризующих максимальное значение напряжённости E_{max} на диагностическом интервале $w = 100$ МГц в зависимости от пробега и величины опережения угла

зажигания. Как следует из рисунка 1, рассмотрение только максимальных значений напряжённости не позволяет с достаточной уверенностью классифицировать результаты диагностики [1, 3, 8].

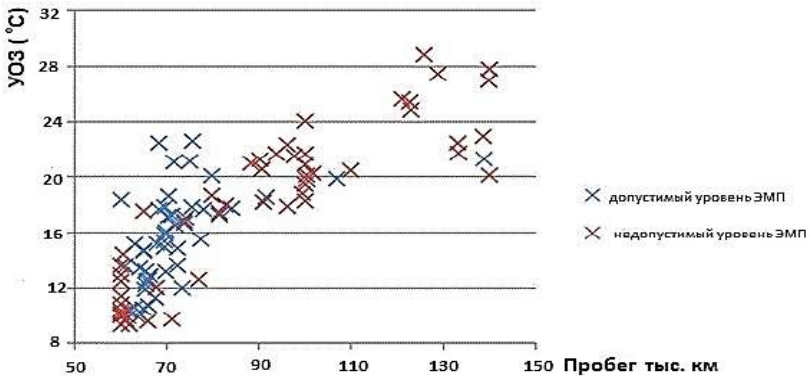


Рис. 1. Кластеризации данных при недостаточном наборе вторичных переменных

По этой причине правильный выбор типа и числа как измеряемых величин, так и вторичных переменных очень важен для создания информативных баз данных, особенно для случаев, когда объём и разнообразие данных сильно лимитировано. Далее будут рассмотрены подходы к систематизации этого выбора.

Выбор измеряемых величин. В начале статьи был указан список шести факторов, влияние которых на уровень ЭМП было исследовано в [8]. В то же время можно предположить, что значимость диагностических данных для применяемых интеллектуальных датчиков, полученных в результате изменения каждого из факторов, будет различной. Для подтверждения этой гипотезы был проведён дробный факторный эксперимент с использованием статистического пакета MINITAB, целью которого было выявление наиболее значимых факторов, с одной стороны влияющих на уровень ЭМП, а с другой – на эффективность ИД в интерпретации диагностических данных.

Дизайн и результаты этого эксперимента сведены в табл. 1, которая демонстрирует усреднённые значения правильно идентифицированных данных по диагностике уровня ЭМП для четырёх видов вторичных переменных (E_{max} , $\bar{E}$, ΔE , $\sigma^2(E)$), поступающих на входы ИД, которые алгоритмически реализуют ИНС, МОВ, БС и АБС.

Для дробного факторного эксперимента используются только пороговые значения влияющих на ЭМП факторов (минимальное и максимальное значения для количественных факторов и типовые значения для качественных).

Таблица 1. Дизайн и результаты дробного факторного эксперимента

Экс. №	Пробег, км	Тип катушки зажигания	Тип топлива	Обороты об/мин ⁻¹	УОЗ °С	Тип ВВП	Достоверность (%)			
							ИНС	МОВ	БС	АБС
1	1000	«Север»	газ	850	8	активное	92.59	83.33	79.63	59.26
2	1000	«Север»	газ	2000	8	компл.	83.87	80.65	80.65	69.35
3	130000	«Север»	газ	850	30	активное	92.59	88.89	79.63	70.37
4	130000	«Север»	газ	2000	30	компл.	98.61	97.22	93.06	81.94
5	1000	МЗАТЭ-2	газ	2000	30	активное	63.24	61.76	57.35	52.94
6	1000	МЗАТЭ-2	газ	850	30	компл.	63.24	57.35	63.24	60.29
7	130000	МЗАТЭ-2	газ	2000	8	активное	92.39	94.57	94.57	91.30
8	130000	МЗАТЭ-2	газ	850	8	компл.	96.30	90.74	94.44	81.48
9	1000	«Север»	бензин	2000	30	активное	85.16	87.5	85.94	80.47
10	1000	«Север»	бензин	850	30	компл.	78.57	70.63	70.63	65.87
11	130000	«Север»	бензин	2000	8	активное	95.14	94.44	93.75	88.89
12	130000	«Север»	бензин	850	8	компл.	82.80	70.97	72.43	68.28
13	1000	МЗАТЭ-2	бензин	850	8	активное	90.36	79.52	78.31	70.48
14	1000	МЗАТЭ-2	бензин	2000	8	компл.	88.78	86.73	78.57	53.06
15	130000	МЗАТЭ-2	бензин	850	30	активное	80.77	80.29	76.44	67.79
16	130000	МЗАТЭ-2	бензин	2000	30	компл.	93.90	94.51	91.46	69.51

На основе полученных результатов, пакет MINITAB определяет значения t - и F -статистик, используемых для вычисления p -параметра, малые (≤ 0.05) значения которого показывают, что вариации в показателях точности используемых ИД не могут быть объяснены только случайной составляющей процесса обучения ИД. Такие значения параметра p говорят о существенном влиянии выбранных факторов на диагностические возможности интеллектуальных датчиков [8, 9, 10].

Для правильной интерпретации данных ИД необходимо настроить эти датчики. С этой целью проводится эксперимент, исследующий характер зависимости точности ИД от величины диагностического интервала или от объёма выборки данных, необходимых для диагностического анализа. Семь различных значений диагностического интервала были определены в соответствии с диапазоном частотных значений (30...1000 МГц) имеющих в наличии спектральных распределений напряжённости ЭМП – 10, 20, 50, 100, 200, 300, 600 МГц. Затем был проведён эксперимент с тем же набором интеллектуальных датчиков (ИНС, МОВ, БС, АБС), что и в

процессе выбора измеряемых величин, и с теми же вторичными переменными (E_{max} , $\bar{E}$, ΔE , $\sigma^2(E)$). При составлении обычающих пар для ИД с использованием «учителя» множество пар было сбалансировано, то есть количество пар, соответствующих приемлемому и недопустимому уровню ЭМП, было одинаковым [2, 7, 8].

Данные эксперимент показывает, что указанные ИД, входящие в состав ИДК, с высокой степенью точности диагностируют превышение уровня ЭМП (погрешность 5.75 %). Этот факт дает нам возможность использовать ИДК для разработки программного кода электронного блока управления двигателем внутреннего сгорания и оптимизации процесса его настройки, что позволяет выводить диагностические коды ошибок, указывающих на превышение уровня ЭМП через монитор маршрутного компьютера. Водителю АТС, когда он увидит код ошибки, обозначающий превышение уровня ЭМП, необходимо будет ехать в специализированный сервисный центр.

Вывод.

Преимуществом интеллектуального диагностического комплекса от существующих средств обработки диагностических данных является его способность к адаптации и настройке внутренних параметров (что в сумме позволяет достичь погрешности работы интеллектуальных датчиков при определении уровня превышения ЭМП в составе бортового комплекса диагностики на уровне 5.75 %).

Литература

1. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами / Дж. Барнс. М.: Мир, 1990. 238 с.
2. Кечиев Л.Н. ЭМС: стандартизация и функциональная безопасность / Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. М.: МИЭМ, 2001. 82 с.
3. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. / А.Д. Князев. М.: Радио и связь, 1984. 336 с.
4. Николаев П.А. Электромагнитная совместимость современных автомобильных систем зажигания: монография [Текст] / П.А. Николаев. Тольятти: ПВГУС, 2011. 224 с.
5. Петровский С.В. Математическое моделирование процессов дугообразования в системе зажигания автомобиля // Журнал Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. №2 (24) Самара: СамГТУ 2009. С. 199-204
6. Петровский С.В., Николаев П.А. Моделирование электромагнитных помех при работе системы зажигания автомобиля // Научные труды V международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Т. 1, Томск. ТПУ. 2014.
7. Петровский С.В., Козловский В.Н., Строганов В.И., Дебелов В.В. Моделирование энергоемких накопителей автомобильной комбинированной энергоустановки // Журнал «Грузовик», №11 М. 2018. С. 1-10

8. Petrovsky S.V., Kozlovsky, V.N., Vakhnina, V.V., Skripnuk, D.F. Determination of the Causes of the Excess of the Level of Electromagnetic Interference from the Ignition System Using an Intelligent Diagnostic System./ Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2020 DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9038934 pp. 569-573.

9. Dhar V., Stein R. Intelligent Decision Support Methods: The Science of Knowledge Work. Prentice Hall, 1997.

10. Quinlan J. R. C4.5: Programs for Machine Learning. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. 302 p. ISBN 1-5586-0238-0

УДК 519.6

Н.А. ШАРАБАНОВ, магистрант,
Л.П. ЧЕРНЫШЕВА, ст.преподаватель

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

Разработка библиотеки параллельных алгоритмов вычислительных методов на основе технологий MPI и openMP

Аннотация. Современные вычислительные задачи требуют эффективных и масштабируемых алгоритмов, но существующие библиотеки часто не адаптированы для параллельных вычислений с MPI и OpenMP. Это ограничивает их применение в сложных задачах, таких как решения СЛАУ, оптимизационные задачи и ОДУ, что подчеркивает необходимость разработки универсальных и высокопроизводительных библиотек. Разработанная библиотека динамической компоновки (DLL-библиотека) реализует параллельные математические алгоритмы, обеспечивая масштабируемость. Включены функции решения ОДУ, СЛАУ и оптимизации, поддерживающие MPI и OpenMP. Возможна кастомизация функций через лямбда-выражения на C++. Библиотека ускоряет вычисления в два-четыре раза по сравнению с традиционными решениями. Гибкость настройки через лямбда-выражения позволяет адаптировать её под конкретные задачи, обеспечивая высокую точность решений и время вычислений, что критично для инженерных и научных применений. Разработанная библиотека ускоряет вычисления и адаптируется под разные задачи. Её применение перспективно в инженерии, науке и исследованиях. В дальнейшем планируется интеграция новых методов.

Ключевые слова: параллельная обработка данных, математические алгоритмы, MPI, OpenMP, системы линейных алгебраических уравнений, обыкновенные дифференциальные уравнения, оптимизация, масштабируемые решения, высокоэффективные инструменты, пользовательская кастомизация.

N.A. SHARABANOV, postgraduate student,
L.P. CHERNYSHEVA, senior lecturer

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskay St., 34
E-mail: nsharabanov@bk.ru

Development of a library of parallel algorithms for computational methods based on MPI and openMP technologies

Abstract. Modern computational problems require efficient and scalable algorithms, but existing libraries are often not adapted for parallel computing with MPI and OpenMP. This limits their application to complex problems such as SLAE solutions, optimization problems and ODEs, which emphasizes the need to develop universal and high-performance libraries. The developed dynamic link library (DLL-library) implements parallel mathematical algorithms, providing scalability. The functions of solving ODEs, SLAEs and optimization supporting MPI and OpenMP are included. Customization of functions via C++ lambda-expressions is possible. The library accelerates calculations two to four times faster than traditional solutions. The flexibility of customization through lambda expressions allows to adapt it to specific tasks, providing high accuracy of solutions and computation time, which is critical for engineering and scientific applications. The developed library accelerates computations and is adaptable to different tasks. Its application is promising in engineering, science and research. The integration of new methods is planned in the future.

Key words: parallel data processing, mathematical algorithms, MPI, OpenMP, systems of linear algebraic equations, ordinary differential equations, optimization, scalable solutions, high-performance tools, user customization.

Разработанные DLL-библиотеки математических алгоритмов с параллельными вычислениями предназначены для использования в инженерных, научных и исследовательских проектах, где требуются высокоэффективные и масштабируемые алгоритмы для решения сложных задач. В частности, эти библиотеки могут быть полезны для специалистов в области вычислительной механики, гидродинамики, математической физики, оптимизации и других областях, где необходимы точные и быстрые результаты математических расчетов.

Разработанные библиотеки предназначены для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и оптимизационных задач. Они обеспечивают пользователю изменять входные данные под свои конкретные потребности, что делает их универсальными инструментами для решения различных математических задач.

В проектах разработки автономных транспортных средств и систем робототехники необходимы высокоэффективные алгоритмы для обработки данных в режиме реального времени, что позволяет обеспечить стабильную работу системы. Разработанные DLL-библиотеки могут быть использованы в таких проектах для оптимизации процессов управления и

контроля автономных транспортных средств, а также для решения задач оптимального управления.

Разработанные DLL-библиотеки для решения параллельных алгоритмов вычислительных задач имеют модульную структуру и включают функционал для решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и задач оптимизации. Основная цель разработки заключается в предоставлении эффективных и гибких инструментов для высокопроизводительных вычислений с использованием технологий MPI, OpenMP и последовательного исполнения.

Библиотека для работы с ОДУ (рис. 1) предоставляет несколько функций, обеспечивающих решение задач данного класса. В их основе лежит метод предиктор-корректор, реализованный в трех вариантах: последовательное выполнение [4], параллельное выполнение с использованием OpenMP и распределенное выполнение с помощью MPI [2, 3]. Функции `ODUSolverPosled()`, `ODUSolverOpenMP()` и `ODUSolverMPI()` скрывают вызов соответствующих классов-решателей: `Predictor Corrector Solver()`, `Parallel Predictor Corrector Solver()` и `MPIPredictorCorrectorSolver()`. Это позволяет пользователю выбрать наиболее подходящий режим выполнения в зависимости от доступных вычислительных ресурсов. Также реализована функция `RegisterCustomFunction()`, которая позволяет пользователю регистрировать собственные функции для использования в решателе, и `SetInitialValues()`, обеспечивающая установку начальных условий задачи.

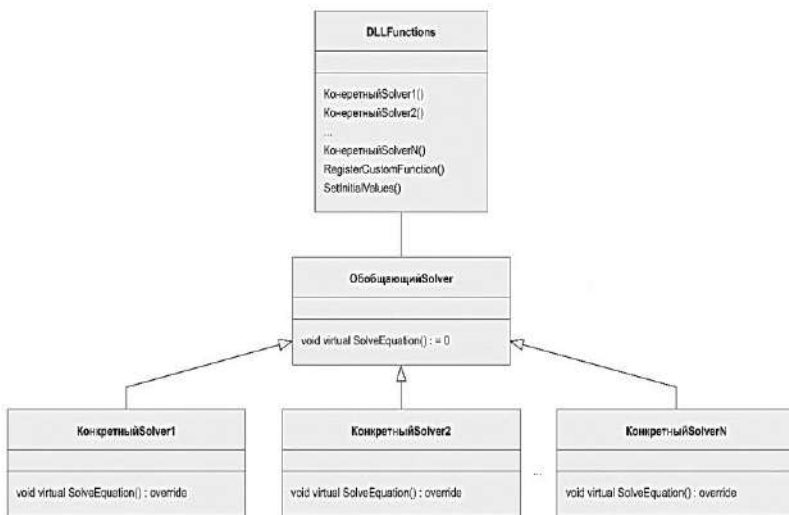


Рис. 1. Обобщенная структура библиотек параллельных алгоритмов

Модуль для работы с СЛАУ (рис.1) включает несколько алгоритмов: метод простых итераций, метод Гаусса-Зейделя и метод Гаусса. Каждая из этих реализаций доступна в трех вариантах выполнения: последовательном, с использованием OpenMP и MPI [2, 3]. Например, функции `SLAUEasyIteration()`, `SLAU Easy Iteration Open MP()` и `SLAUEasyIterationMPI()` предоставляют доступ к решению методом простых итераций в соответствующих режимах. Аналогичным образом организованы функции для других методов, включая `SLAUGaussZedel()` и `SLAUGauss()`, что обеспечивает единообразие и простоту интеграции библиотеки в пользовательские приложения.

Модуль для решения задач оптимизации (рис. 1) включает реализации метода сканирования и метода градиентного спуска в последовательном [1], параллельном и распределенном вариантах [2,3]. Функции `Optimization Methods Scan()`, `Optimization Methods Scan Open MP()`, `OptimizationMethodsGradDescent()` и их аналоги предоставляют разработчикам гибкий инструмент для нахождения экстремумов целевых функций. Дополнительно библиотека поддерживает настройку параметров оптимизации через функцию `Set Optimization Settings()`, а также регистрацию пользовательских функций и их производных с помощью `SetCustomFunc()`, `Set CustomProizvX1Func()` и `SetCustom ProizvX2Func()`.

Вся структура библиотеки построена таким образом, чтобы минимизировать сложность интеграции в существующие проекты, сохраняя при этом гибкость и мощность используемых алгоритмов. Реализация интерфейсов на основе стандартов C++ обеспечивает высокую производительность и масштабируемость, а поддержка пользовательских функций и параметров делает библиотеку универсальным инструментом для решения задач в научных, инженерных и прикладных областях.

Разработанные библиотеки для решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и задач оптимизации представляют собой универсальные инструменты для решения широкого класса вычислительных задач. Каждая из библиотек предоставляет возможности для последовательных, многопоточных и распределённых вычислений, что позволяет эффективно использовать доступные вычислительные ресурсы – от персональных компьютеров до кластерных систем.

Объединяя в себе гибкость настройки, высокую производительность и масштабируемость, разработанные библиотеки удовлетворяют современным требованиям к вычислительным инструментам. Они могут быть использованы в научных исследованиях, инженерных приложениях и образовательных проектах, где важны точность, скорость вычислений и адаптивность алгоритмов. В дальнейшем планируется расширение функциональности библиотек за счёт добавления новых методов, функций для решения задач на GPU.

Одним из ключевых преимуществ библиотеки является возможность настройки параметров перед выполнением вычислений. Пользователь может задать начальные условия, точность вычислений, параметры численных методов, а также зарегистрировать пользовательские функции для описания специфики задачи. Это позволяет модифицировать поведение решателей без необходимости вносить изменения в исходный код, что делает библиотеку удобной для широкого спектра задач, включая научные исследования и инженерные расчёты.

Работа с библиотекой организована через динамическую загрузку, что обеспечивает независимость пользовательского кода от реализации функций. Библиотека загружается в память во время выполнения программы, а необходимые функции извлекаются и вызываются по мере необходимости. Такой подход не только уменьшает нагрузку на систему, но и позволяет работать с разными версиями библиотеки без перекомпиляции основного приложения.

Для выполнения параллельных вычислений предусмотрена поддержка OpenMP и MPI. В многопоточных режимах библиотеки распределяют вычисления между ядрами процессора, обеспечивая ускорение работы. В распределённой среде с использованием MPI вычислительный процесс делится между несколькими узлами, что позволяет решать задачи повышенной сложности, требующие значительных ресурсов. Использование этих технологий даёт возможность масштабировать вычисления в зависимости от доступных аппаратных возможностей.

Гибкость библиотеки позволяет пользователю выбирать оптимальный метод решения в зависимости от типа задачи и доступных ресурсов. Поддержка различных численных методов, включая методы решения дифференциальных уравнений, систем линейных уравнений и оптимизационных задач, делает её универсальным инструментом для вычислительных задач. Благодаря этому разработанная библиотека является мощным решением для моделирования, анализа и оптимизации математических процессов в научных и инженерных приложениях.

Литература

1. Пантелеев А.В. Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. 2025.
2. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface. 1999
3. Chandra, R., Menon, R., Dagum, L., Kohr, D., Maydan, D., & McDonald, J. Parallel Programming in OpenMP. 2001.
4. Butcher, J. C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations. 2008.

УДК 004.8+004.6+004.9

С.А. ЛЯПИН, аспирант,
С.Г. СИДОРОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
Email: sergey.l37@icloud.com

Анализ методов представления данных и архитектурных решений для 3D-реконструкции помещений на основе видеоданных

Аннотация. В работе проведён анализ методов представления данных и архитектурных решений для 3D-реконструкции помещений по видеоданным с целью повышения точности и полноты пространственного моделирования интерьеров.

Ключевые слова: 3D-реконструкция, представление данных, нейронные сети, глубокое обучение, компьютерное зрение.

S.A. LYAPIN, graduate student,
S.G. SIDOROV, Ph.D., Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskay St., 34
Email: sergey.l37@icloud.com

Analysis of data representation methods and architectural solutions for 3D-reconstruction of premises based on video data

Annotation. The paper analyzes data representation methods and architectural solutions for 3D reconstruction of rooms from video data to improve the accuracy and completeness of spatial modeling of interiors.

Key words: 3D-reconstruction, data representation, neural networks, deep learning, computer vision.

Автоматическая реконструкция 3D-моделей помещений по видеоданным направлена на создание точной трехмерной структуры сцены. Основная сложность заключается в необходимости обеспечить высокую точность реконструкции при недостаточно выраженных текстурах, динамических изменениях освещения, оптических искажениях и ограниченном обзоре. Традиционные методы компьютерного зрения часто оказываются неэффективными для внутренних интерьеров, что приводит к внедрению методов глубинного обучения.

Быстрое автоматическое построение 3D-моделей помещений по видеоданным является актуальной задачей, решение которой открывает новые возможности для робототехники, архитектуры, виртуальной реальности, а также для медицины, например, в создании виртуальных интерьеров для реабилитации пациентов, перенесших инсульт.

В данной работе рассматривается проблема 3D-реконструкции помещения на основе видеоданных с акцентом на анализ методов представления данных и архитектурных решений нейросетей, используемых для этой задачи. Иными словами, мы изучаем, как именно представляется геометрия сцены во время обучения и работы нейронной сети и какие архитектуры нейросетей позволяют эффективно восстанавливать структуру помещения из набора изображений. Правильный выбор представления данных (выходной формат 3D-модели или внутреннего признакового описания) играет ключевую роль в успешном обучении сети, а архитектура сети определяет, насколько эффективно она может объединять информацию с разных ракурсов и восстанавливать сложные пространственные отношения.

Методы представления данных для 3D-реконструкции можно условно разделить на несколько групп в зависимости от способа описания геометрии сцены. Одним из первых подходов было использование дискретных представлений, то есть оккупационных сеток. В моделях типа 3D-R2N2 нейронная сеть предсказывает, какие воксели фиксированной кубической решётки заняты объектами (например, стенами, мебелью), формируя таким образом объемную модель помещения [1]. Преимущество такого подхода заключается в простоте реализации и прямой совместимости с архитектурами 3D-сверточных сетей. Однако применение высокоразрешённых сеток приводит к экспоненциальному увеличению числа элементов и, как следствие, к высоким вычислительным затратам, что вынуждает применять относительно грубые сетки (например, 32^3 или 64^3 элементов). Это ограничивает детализацию реконструкции, поскольку мелкие элементы интерьера могут сглаживаться или полностью теряться.

Для преодоления этих ограничений разработаны неявные непрерывные представления. В этом подходе модель обучается выдавать значение функции занятости

$$o : R^3 \rightarrow \{0, 1\}, \quad (1)$$

где o – функция занятости; R^3 – это трехмерное евклидовое пространство, состоящее из всех векторов.

Для любой непрерывной точки пространства, что позволяет описывать поверхность сцены в виде её уровневой границы. Такие модели, как Occipansu Networks, не требуют дискретизации пространства на фиксированную решётку, что обеспечивает практически неограниченную детализацию реконструируемой геометрии [2]. Кроме того, неявные представления гибко применимы для разных входных данных: они могут использоваться не только с одиночными изображениями, но и с облаками точек или предварительно полученными грубыми воксельными моделями. Экспериментальные исследования показывают, что подобный подход позволяет эффективно кодировать сложную 3D-структуру и достигать конкурентного качества реконструкции по различным метрикам.

Еще одной перспективной категорией являются методы, основанные на представлении сцены в виде непрерывных нейронных лучевых полей, известных как Neural Radiance Fields (NeRF). Эти методы обучаются предсказывать не только плотность материала, но и цветовую информацию для каждой точки пространства, что позволяет создавать фотореалистичные визуализации сложных сцен [3].

Одним из прорывных решений стало представление сцены в виде набора 3D-гауссианов, известное как 3D Gaussian Splatting. Идея заключается в том, чтобы заменить плотное поле на совокупность разбросанных в пространстве «капель» (гауссовых функций), параметры которых оптимизируются под данные изображения. Этот подход значительно повышает эффективность: так, метод ODGS, адаптированный для всенаправленных (панорамных) камер, достигает скорости оптимизации и визуализации, в 100 раз превышающей скорости NeRF-подходов, при этом обеспечивая высокое качество получаемой сцены [3].

Особое место среди современных методов представления данных занимает подход, использующий сферическую систему координат для описания 3D-сцены [4]. Такой метод позволяет моделировать объекты посредством представления их глубины в виде радиусной компоненты, а угловые параметры описываются через разложение по сферическим гармоникам (СГ).

$$C = F_{\beta}^{-1}\{H\} = \sum_{l=0}^L \sum_{m=-l}^l H_{lm} \beta_{lm}(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где C - восстановленное угловое поле; F_{β}^{-1} - обратное преобразование из пространства коэффициентов в угловое пространство, используя базис СГ β ; $\beta_{lm}(\theta, \varphi)$ - базисные функции SH, т. е. полиномы Лежандра; H_{lm} - прогнозируемые коэффициенты; l и m - степень и порядок гармоник, соответственно.

Данное представление обладает универсальностью: оно адаптивно ко множеству типов камер, включая нестандартные и панорамные. Отказ от использования традиционных карт глубины и переход к сфере обеспечивает более стабильное восстановление геометрии, особенно при работе с изображениями, обладающими широким углом обзора.

Таким образом, выбор метода представления данных напрямую влияет на архитектурное решение нейросети и определяет качество, скорость и обобщаемость реконструкции. Современные исследования демонстрируют, что комбинирование дискретных, неявных и сферических подходов позволяет создать гибкие и масштабируемые системы для 3D-реконструкции помещений, способные точно восстанавливать сложную структуру интерьера даже при наличии оптических искажений и ограниченности входных данных.

Помимо формата представления данных, критическим фактором успеха является архитектура нейронной сети, преобразующей входные изображения в 3D-модель. Различные архитектурные решения отражают способы агрегировать информацию с нескольких ракурсов и выражать сложную геометрию сцены.

Рекуррентные и многокамерные сети. Для интеграции информации из последовательных видеок кадров часто применяют рекуррентные нейросети, например, модель 3D-R2N2 с LSTM-блоком, который поочерёдно обрабатывает признаки каждого изображения и обновляет внутреннее представление объекта [1]. Такое многоракурсное обучение позволяет постепенно накапливать сведения о различных частях сцены по мере обхода помещения камерой. Рекуррентный подход хорошо подходит для последовательностей кадров, однако его обучение бывает сложным, а модель не всегда эффективно использует одновременно доступные данные, например, при наличии набора фотографий. В качестве альтернативы применяются архитектуры с несколькими «головами» или объединяющими слоями, использующими механизм внимания или простое усреднение признаков карт для совмещения информации из различных ракурсов. Ранняя реализация рекуррентных подходов также страдала от накопления ошибок, что приводило к потере согласованности 3D-модели при длительной последовательной обработке.

Encoder-Decoder с неявным представлением. В таких архитектурах, как Occupancy Networks, encoder-сеть обрабатывает вход (изображение или облако точек) и извлекает глобальный латентный код сцены, а decoder-сеть, часто реализованная как многослойный перцептрон, принимает 3D-координаты и возвращает значение функции, характеризующей занятость или плотность в этих точках [2]. Такой подход разделяет задачу на понимание общей структуры с помощью encoder-сети и детальное восстановление формы с помощью decoder-сети. Decoder реализует отображение

$$\begin{cases} \mathbf{R}^3 \rightarrow [0,1], \text{ для занятости} \\ \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}^+, \text{ для плотности} \end{cases} \quad (3)$$

где $\mathbf{R}^3$ – трёхмерное евклидово пространство, состоящее из всех векторов; $\mathbf{R}^+$ – подмножество действительных чисел, включающее только положительные значения.

и часто снабжается механизмом передачи признаков, позволяющим дополнительно использовать локальные признаки из encoder. Эти гибридные архитектуры доказали свою способность детально реконструировать сложные сцены без необходимости экспоненциального увеличения размера сети.

Универсальные модели для различных камер. В задачах реконструкции помещений видеоданные поступают с устройств разного типа – от стандартных камер с узким углом обзора до панорамных систем и объек-

тивов «рыбьего глаза». Традиционные сверточные сети рассчитывают на плоские изображения, полученные по модели pinhole, что не учитывает оптических искажений нестандартных объективов и приводит к потере части поля зрения и искажению геометрии сцены. Новейший метод UniK3D предлагает архитектуру, способную работать с любыми моделями камер без дополнительной калибровки [4]. В архитектуре реализуется специальный модуль камеры, выполняющий обучаемое представление пучка лучей, что позволяет кодировать ориентацию и параметры объекта независимо от типа проецирования.

Рассмотренные методы и модели демонстрируют существенный прогресс в задаче 3D-реконструкции помещений, однако обладают разными преимуществами и ограничениями. Дискретные сеточные методы просты и эффективно обучаются на ограниченных данных, но страдают от грубого разрешения и масштабных вычислительных затрат при попытке его повысить. Неявные представления обеспечивают непревзойденную детализацию и могут компактно хранить сложную геометрию, но для их использования требуются специальные архитектуры и алгоритмы выборки точек; кроме того, некоторые (например, NeRF) требуют длительной оптимизации под каждую новую сцену и пока недостаточно быстры для оперативных приложений [3]. Улучшения типа Gaussian Splatting частично решают эту проблему, позволяя получать качественные модели значительно быстрее, что критично для практики [3].

С точки зрения архитектуры многоракурсные нейросети успешно решают проблему агрегации информации, но должны быть устойчивы к порядку и количеству входных изображений. Рекуррентные сети, как показал опыт 3D-R2N2, могут интегрировать последовательность кадров, хотя и не гарантируют идеальной консистентности при длинных последовательностях. Современные подходы все чаще используют параллельную обработку нескольких видов (например, через механизм внимания или через граф-сети, связывающие камеры), что потенциально более масштабируемо.

Универсальные модели типа UniK3D указывают на важность учета параметров съёмки: их результаты убедительно показывают, что игнорирование модели камеры приводит к деградации качества, и наоборот, инвариантность к камерам существенно расширяет область применимости модели [4]. UniK3D достигает высокой точности даже на экстремальных обзорах благодаря продуманной архитектуре, и это достижение открывает дверь к созданию «единой» нейросети для любых устройств съёмки. Тем не менее, универсальность часто требует более сложного обучения и больших объемов данных, поэтому внедрение таких моделей может сопровождаться повышенными требованиями к обучающей выборке (необходимо охватить разнообразные типы камер и условий съёмки).

Комбинирование подходов представляется наиболее плодотворным направлением. Анализ показывает, что чисто нейросетевые решения

могут страдать от неверных реконструкций, не учитывающих физическую правдоподобность (например, стена может получиться изогнутой, если сеть не "знает", что стены обычно плоские). Добавление же геометрических ограничений или пост-обработки способно устранить подобные артефакты. С другой стороны, классические методы без обучения не в состоянии восстанавливать невидимые части сцены или обобщать знания, тогда как нейросети, обученные на большом количестве помещений, способны достраивать скрытые детали на основании опыта. Таким образом, симбиоз алгоритмических и обучаемых компонентов позволит достичь наилучших результатов.

3D-реконструкция помещений на основе видеоданных – динамично развивающаяся область, в которой за последнее десятилетие произошел качественный скачок благодаря внедрению методов глубинного обучения. Анализ методов представления данных показал переход от жестких дискретных структур к гибким неявным моделям и гибридным представлениям, что позволило значительно повысить детализацию и полноту восстанавливаемых 3D-моделей. Параллельно, архитектурные решения нейросетей эволюционировали от простых рекуррентных схем к сложным многоуровневым системам, учитывающим множество факторов. В частности, метод UniK3D демонстрирует, что тщательная проработка архитектуры (сферическое пространство признаков, явная моделировка камеры и специальная функция потерь) обеспечивает превосходящие результаты в широком спектре условий съемки [4].

Несмотря на достигнутый прогресс, задача далека от полного решения. Требуется дальнейшая работа над повышением универсальности и устойчивости методов – например, объединение идей ускоренного дифференцируемого рендеринга (Gaussian Splatting) с обобщающими возможностями универсальных сетей (UniK3D). Перспективным направлением является интеграция классических алгоритмов в этапы работы нейросетей, чтобы использовать их сильные стороны совместно.

Литература

1. Choy C. B. 3D-R2N2: A Unified Approach for Single and Multi-view 3D Object Reconstruction. Computer Vision – ECCV, 2016. pp. 628–644
2. Mescheder L. Occupancy Networks: Learning 3D Reconstruction in Function Space. CVPR, 2019. pp. 4460–4470.
3. Lee S. ODGS: 3D Scene Reconstruction from Omnidirectional Images with 3D Gaussian Splatting. NeurIPS, 2024. 19 p.
4. Piccinelli L. UniK3D: Universal Camera Monocular 3D Estimation. arXiv preprint arXiv:2503.16591, 2025

УДК 004.522

В.А. НЕЧАЕВ, исследователь
С.В. КОСЯКОВ, д.т.н.

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

Мультиязычная система речевого взаимодействия в реальном времени для колл-центров

Аннотация. Рассматривается система речевого взаимодействия в реальном времени для колл-центров, объединяющая элементы классических диалоговых человеко-машинных систем, а также прикладные нейросетевые модели для уменьшения иностранного акцента, мультиязычного и предметно-ориентированного распознавания речи. Практическая реализация и испытания в реальных условиях подтвердили эффективность предложенной системы.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронная сеть, распознавание речи, конвертация акцента

V.A. NECHAEV, researcher
S.V. KOSYAKOV, Doctor of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskay St., 34
E-mail: nechaev@gapps.ispu.ru

Multilingual real-time speech interaction system for call-centers

Abstract. A real-time speech interaction system for call-centers is considered. It combines elements of classical human-machine dialogue systems, as well as applied neural network models for foreign accents conversion, multilingual and domain-specific speech recognition. Practical implementation and real-world testing have confirmed the effectiveness of the proposed system.

Key words: machine learning, neural network, automatic speech recognition, accent conversion

Системы речевого взаимодействия (СРВ) используются для автоматизации работы колл-центров, работающих как на внутреннем, так и на международном уровнях. В процессе коммуникации, наряду с национальными языками, может применяться также язык-посредник, носителями которого участники диалога не являются, например английский, а также узкоспециализированная лексика. Это приводит к сложностям взаимопонимания в процессе общения из-за наличия иностранного акцента и проблем с произношением [1], а также к ошибкам систем распознавания речи при смешении языков и наличии специфических терминов.

В настоящее время для решения данных проблем применяются различные прикладные нейросетевые системы для уменьшения иностранного акцента [2, 3], параллельного речевого перевода [4], мультиязычного [5]

– 7] и предметно-ориентированного [8] распознавания речи. Они используются в различных традиционных для колл-центров СРВ в качестве отдельных составляющих [9, 10]. Объединение таких систем в единую мультязычную СРВ с целью комплексного улучшения речевого взаимодействия в реальном времени остаётся актуальной задачей, решение которой рассматривается в данном докладе.

Традиционные СРВ включают в себя: телекоммуникационную систему (ТКС) для обеспечения прямого и обратного каналов связи, систему распознавания речи (СРР), систему баз данных (СБД) и аналитическую систему для автоматизации и контроля. Предлагаемая СРВ, в отличие от традиционной, содержит также мультязычную предметно-ориентированную систему распознавания речи (МПО СРР) и систему модификации речи (СМР) для изменения голоса человека в реальном времени.

Предлагаемая СРВ обеспечивает как прямой канал речевого взаимодействия между клиентом и оператором, аналогичный традиционным СРВ, так и модифицированный канал связи. При этом модификации в реальном времени может подвергаться речь всех участников диалога. СМР также уменьшает фоновый шум и улучшает качество голоса [2–4], что положительно сказывается на качестве коммуникации. Вместе с необработанной речью по прямому каналу через ТКС в СБД передаётся также модифицированная речь с СМР. Это позволяет сохранять исходную и изменённую информацию в базе данных для дальнейшего анализа, а также улучшать качество распознавания МПО СРР, в частности за счёт исправления иностранного акцента.

Реализация МПО СРР выполнена на основе архитектуры модели, описанной в работах [5, 6] и метода, представленного в статье [8]. В качестве СМР используется неавторегрессионная модель конвертации акцента с клонированием голосовых характеристик в реальном времени, описанная в работе [3]. Английский язык выбран, как язык-посредник.

Предлагаемая СРВ была развернута в колл-центре для обработки обращений клиентов предприятия сферы энергетики и информационных технологий. Для оценки качества были собраны тестовые данные общей продолжительностью 6,2 часа, которые не участвовали в процессе обучения моделей в составе СРВ. Записи представляют собой разговоры клиентов и операторов колл-центра на русском и английском языках, а также их смеси. Результаты оценки качества представлены в табл.1.

Анализ таблицы показывает, что предложенная СРВ с МПО СРР и СМР (Conformer + М + ПО + СМР) демонстрирует наилучшее качество распознавания на тестовых данных для русскоязычной и смешанной русско-английской речи с наличием иностранного акцента, постороннего шума и предметно-ориентированной лексики по всем метрикам качества – частота ошибок в словах (WER), символах (CER) и терминах (TER).

Выполнены замеры производительности предложенной СРВ, которые продемонстрировали задержки до 350 миллисекунд, что удовлетворяет

требованиям систем голосовой коммуникации в реальном времени и не вызывает дискомфорт у участников диалога при общении [11].

Таблица 1. **Результаты оценки качества предлагаемой СРВ**

Тип СРВ	WER, %	CER, %	TER, %
Whisper Large [7]	18,5	14,1	22,7
Conformer [5]	13,1	7,9	16,6
Conformer + М [5, 6]	12,2	7,1	16,2
Conformer + ПО [8]	11,8	6,6	10,4
Conformer + СМР [3]	12,3	7,2	15,9
Conformer + М + ПО + СМР	8,9	5,4	8,5

Предложенная мультязычная СРВ показала свою эффективность и может использоваться в колл-центрах в сценариях коммуникации в реальном времени.

Литература

1. Lev-Ari S., Keysar B. Why don't we believe non-native speakers? The influence of accent on credibility // *Journal of experimental social psychology*. 2010. Т. 46. №. 6. С. 1093-1096.
2. Jin M., Serai P., Wu J., Tjandra A., Manohar V., He Q. Voice-preserving zero-shot multiple accent conversion // *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. – IEEE. 2023. С.1-5.
3. Nechaev V., Kosyakov S. Non-autoregressive real-time Accent Conversion model with voice cloning // *arXiv preprint arXiv:2405.13162*. 2024.
4. SEAMLESS Communication Team. Joint speech and text machine translation for up to 100 languages // *Nature*. 2025. Т. 637. №. 8046. С. 587-593.
5. Gulati A., Qin J., Chiu C., Parmar N., Zhang Y., Yu J., Han W., Wang S., Zhang Z., Wu Y., Pang R. Conformer: Convolution-augmented transformer for speech recognition // *arXiv preprint arXiv:2005.08100*. 2020.
6. Hu K., Li B., Sainath T. N., Zhang Y., Beaufays F. Mixture-of-expert conformer for streaming multilingual asr // *arXiv preprint arXiv:2305.15663*. 2023.
7. Radford A., Kim J. W., Xu T., Brockman G., McLeavey C., Sutskever I. Robust speech recognition via large-scale weak supervision // *International conference on machine learning*. PMLR, 2023. С. 28492-28518.
8. Нечаев В. А., Косяков С. В. Метод разработки моделей распознавания речи для использования в информационных системах энергетики // *Вестник ИГЭУ*. 2023. №. 4. С. 94-100.
9. Verma T., Shree A., Modi A. ASR for Low Resource and Multilingual Noisy Code-Mixed Speech // *Proceedings of Interspeech*. Dublin, Ireland. 2023.
10. Biadsy F., Weiss R. J., Moreno P. J., Kanevsky D., Jia Y. Parrottron: An end-to-end speech-to-speech conversion model and its applications to hearing-impaired speech and speech separation // *arXiv preprint arXiv:1904.04169*. 2019.
11. International Telecommunication Union. Recommendations ITU-T G.114: One-way transmission time. Geneva: ITU, 2003. 15 P.

УДК 004.932.2

Е.С. ДЕНИСОВ, к.т.н.,
Н.Г. ГАЙФУЛЛИН, студент

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева – КАИ
420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 31/7
E-mail: gaifullinnm@gmail.com

Аппаратно-программный комплекс для автоматизированного контроля сборки печатных плат на основе модели нейросети YOLO V11 и платформы Raspberry Pi

Аннотация. В работе представлена система контроля сборки печатных плат с использованием YOLOv11 и Raspberry Pi. Рассмотрена структура и принцип работы аппаратно-программного комплекса, а также процесс обучения нейросетевой модели.

Ключевые слова: компьютерное зрение, нейросеть, YoloV11, Raspberry Pi, обучение нейросети

E.S. DENISOV, associate professor,
N.M. GAIFULLIN, student

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
420111, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, st. K. Marx, 31/7
E-mail: gaifullinnm@gmail.com

Hardware-software complex for automated control of printed circuit board assembly based on YOLO V11 neural network model and Raspberry Pi platform

Abstract. This article presents a control system for PCB assembly using YOLOv11 and Raspberry Pi. The structure and principle of operation of the hardware-software complex, as well as the process of training of the neural network model are considered

Key words: computer vision, neural network, YoloV11, Raspberry Pi, neural network training

Обеспечение надёжности электронных устройств напрямую зависит от качества сборки печатных плат. Традиционные методы визуального контроля требуют значительных трудозатрат и подвержены человеческому фактору, что делает актуальной задачу автоматизации процесса с применением технологий компьютерного зрения [1]. Эффективным решением в данной области являются нейросетевые модели детекции объектов, в частности YOLOv11, обладающая высокой скоростью и точностью обработки изображений. В данной работе представлен аппаратно-программный комплекс на базе Raspberry Pi 4B и модели на основе нейросетевой архитектуры YOLOv11 для автоматизированного контроля сборки печатных плат.

Рассматриваемая система реализована с использованием платформы Raspberry Pi 4B и нейросетевой модели YOLOv11, предварительно обученной на специализированном наборе изображений электронных компонентов. Общая архитектура системы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Функционирование системы построено на последовательной обработке изображения собранной печатной платы: на первом этапе осуществляется захват визуального представления с использованием фиксированной камеры высокого разрешения, после чего полученное изображение поступает в модуль предобработки, реализованный на основе библиотеки OpenCV, где выполняется коррекция перспективных искажений, нормализация освещения, цветокоррекция и масштабирование до входного разрешения нейросетевой модели, что обеспечивает инвариантность распознавания по отношению к условиям съемки и геометрическим отклонениям.

Следующим этапом является инференс – обработка изображения в рамках детекционной модели YOLOv11, адаптированной под архитектуру ARM-процессора посредством преобразования в формат ONNX и дальнейшей оптимизации посредством PyTorch Lite. В результате чего формируется список ограничивающих рамок (bounding boxes), каждая из которых содержит координаты предполагаемого компонента, его класс и значение показателя точности, определяющее уверенность модели в правильности классификации.

Далее данные поступают в логический модуль анализа, где происходит сравнение текущей детекции с эталонной схемой, представленной в виде конфигурационного JSON-файла, в котором задано ожидаемое расположение и тип каждого компонента. Сопоставление проводится с заданной допусковой зоной, позволяющей учитывать небольшие отклонения при ручной сборке. При обнаружении расхождений – будь то отсутствие элемента, его смещение за пределы допустимой области или ошибка классификации – система формирует отчет, содержащий

координаты, идентификаторы и описание отклонений, а также визуализирует эти данные в виде аннотированного изображения, пригодного для ручной верификации или последующей передачи на этап технического контроля.

Особенностью реализации является возможность циклической работы комплекса с обработкой поступающих изображений в потоке, что делает его применимым не только для лабораторных испытаний, но и в составе производственной линии. Также оптимизация нейросетевой модели и упрощенная архитектура аппаратной части позволяют достигать скорости обработки до 1 кадра в секунду без необходимости в дискретной GPU-подсистеме.

Ключевым этапом при построении системы автоматизированного контроля является предварительное обучение [2] модели YOLOv11 на специализированном датасете, сформированном из изображений реальных печатных плат, в частности в данной работе – платы Arduino Uno, использованной в качестве эталонного объекта. Обучение проводилось с целью адаптации модели к условиям анализа собранных схем и обеспечения высокой точности детекции с учётом реальных искажений, таких как варьирующееся освещение, наклон съёмки и посторонние визуальные шумы.

Процесс подготовки данных включал съёмку плат под различными углами и при разном освещении, а также ручную аннотацию изображений с использованием инструментов разметки, что позволило сформировать сбалансированный набор размеченных данных, охватывающий основные визуальные конфигурации целевых объектов. Датасет был разделён на обучающую и тестовую выборки в пропорции 80/20, при этом в ходе обучения применялись методы аугментации данных – такие как поворот, масштабирование и изменение яркости – для повышения обобщающей способности модели.

Модель YOLOv11 обучалась с использованием адаптированных гиперпараметров: значение скорости обучения подбиралось эмпирически с учётом стабильности сходимости, а в качестве функции потерь применялась составная метрика, учитывающая как пространственную ошибку детекции, так и ошибку классификации. Обучение производилось на отдельной рабочей станции с GPU-ускорением, после чего модель была конвертирована в формат, совместимый с ARM-платформой Raspberry Pi, с учётом ограничений по памяти и вычислительным ресурсам.

Результаты обучения показали стабильное распознавание целевых элементов на изображениях, полученных как в контролируемых условиях, так и в реальных сценариях, что позволило обеспечить устойчивость работы системы в разнообразной визуальной среде. Архитектура детекционной части модели, отражающая использование многомасштабных свёрточных слоёв и упрощённых блоков объединения признаков, представлена на рис. 2.



Рис. 2. Архитектура детекционной части нейросети YOLO v11

Таким образом, предварительно обученная модель продемонстрировала высокую точность и устойчивость к внешним искажениям, что позволило интегрировать её в систему контроля без необходимости постоянной перенастройки под конкретные объекты.

Вывод. В ходе работы была реализована система автоматизированного контроля сборки печатных плат, основанная на использовании нейросетевой архитектуры YOLOv11 и платформы Raspberry Pi. Проведённая интеграция обученной модели в программный комплекс позволила обеспечить высокую точность детекции ошибок, таких как отсутствие компонентов или их неправильное размещение, при сохранении низких требований к вычислительным ресурсам, что делает решение пригодным для использования как в лабораторных условиях, так и в рамках производственных процессов.

В дальнейшем планируется расширение набора обучающих данных, внедрение процедур самообучения на новых образцах в реальном времени, а также оптимизация модуля интерпретации результатов с возможностью интеграции в различные системы мониторинга [3] в производственных линиях.

Литература

1. Компьютерное зрение [Электронный ресурс] / Л. Шапиро, Дж. Стокман. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с
2. Контроль и прогнозирование критических режимов работы водородных топливных элементов в процессе эксплуатации на основе искусственных нейронных сетей / Е.С. Денисов, Н.Р. Гайсин, Т.П. Никишин, Н.А. Адъютантов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 12. С. 11-16. DOI 10.25791/pribor.12.2021.1308. EDN ZWNFWWW.
3. Оценка возможности реализации распределенных систем диагностики водородных топливных элементов с использованием локальных и глобальных телекоммуникационных сетей / Е.С. Денисов, Р.Р. Енилиев, Н.Р. Гайсин, И.Д. Шафигуллин // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 4-10.

УДК 004.3+004.5+004.8

Е.П. ИВЛИЧЕВ, аспирант,
С.Г. СИДОРОВ, к.т.н., доцент

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

**Интеллектуальные нейроинтерфейсы нового поколения:
беспроводной анализ ЭЭГ на сухих электродах с применением
нейронных сетей в условиях подвижности пациента**

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы реализации беспроводного нейроинтерфейса на сухих электродах для мониторинга нейроактивности. Мобильный интерфейс мозг-компьютер актуален для задач телемедицины, нейрореабилитации и управления техническими системами в режиме реального времени.

Ключевые слова: ЭЭГ, нейроинтерфейс, сухие электроды, беспроводная передача, ИИ, фильтрация сигналов.

E.P. IVLICHEV, postgraduate student,
S.G. SIDOROV, PhD, associate professor

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskay St., 34
E-mail: jenyiv@mail.ru

**Intelligent neural interfaces of the new generation:
wireless EEG analysis on dry electrodes using neural networks
in conditions of patient mobility**

Abstract. The paper considers the issues of implementing a wireless neural interface on dry electrodes for monitoring neuroactivity. A mobile brain-computer interface is relevant for telemedicine, neurorehabilitation and control of technical systems in real time.

Key words: EEG, neural interface, dry electrodes, wireless transmission, AI, signal filtering.

Введение

Современные нейроинтерфейсы, реализуемые на базе классических проводных ЭЭГ-систем, обладают рядом технологических ограничений. Использование гелей, абразивных паст, а также требование к неподвижности пациента серьезно сужают спектр возможных применений таких систем, особенно в условиях двигательной активности. В реабилитационной практике и нейрокогнитивных исследованиях всё чаще возникает необходимость регистрировать нейрофизиологические данные в движении – например, при взаимодействии с беговыми дорожками, велотренажёрами или в условиях виртуальной реальности.

В качестве технической альтернативы выступают решения на основе сухих электродов, не требующих увлажнения и обеспечивающих регистрацию сигнала с приемлемым уровнем импеданса [1]. Использование беспроводной передачи данных в составе шлемов BCI (Brain-Computer

Interface) обеспечивает свободу передвижения и возможность интеграции в разнообразные исследовательские или прикладные установки.

Технология BCI позволяет осуществлять интерфейс между мозгом человека и внешними устройствами без задействования мышечной активности или речевого аппарата [2]. Это особенно актуально в задачах нейрореабилитации, когнитивной нейронауки и управления внешними устройствами с помощью мыслительных процессов.

Регистрация ЭЭГ в условиях двигательной активности

Одной из основных проблем при регистрации ЭЭГ-сигналов в условиях движения пациента является существенное увеличение количества артефактов различной природы – миографических, окулографических, электростатических, дыхательных, а также обусловленных подвижностью самих электродов. Статические методы фильтрации, такие как ICA или традиционные полосовые фильтры, зачастую не способны адекватно компенсировать динамическую изменчивость шумов.

Это требует применения адаптивных алгоритмов предобработки, способных в реальном времени выделять полезный сигнал на фоне искажений и артефактов, а также обеспечивать корректную классификацию событий.

Аппаратная реализация:

OpenBCI как платформа беспроводного нейроинтерфейса

Платформа OpenBCI представляет собой модульное и открытое решение для регистрации и анализа нейрофизиологических сигналов. Основным вычислительным модулем является плата Cyton, оснащённая высокоточным 8-канальным 24-битным АЦП (с возможностью расширения до 16 каналов при подключении модуля Daisy). Частота дискретизации составляет 250 Гц, чего достаточно для подавляющего большинства нейрофизиологических задач.

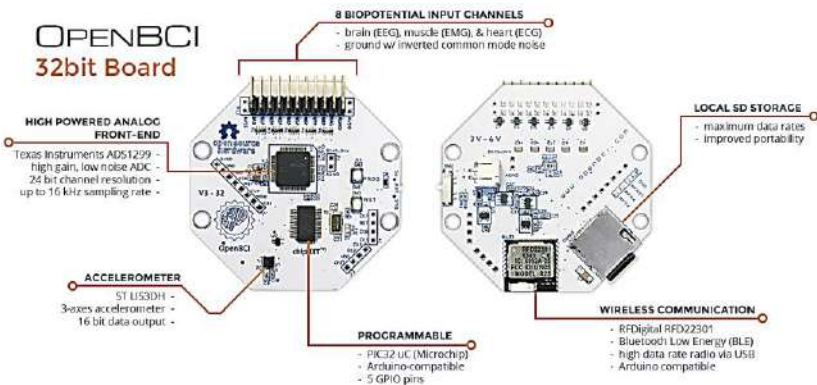


Рис. 1. Модуль беспроводной передачи данных OpenBCI

В работе использовался модуль ЭЭГ OpenBCI для сбора данных ЭЭГ, их предварительной обработки и передачи по радиointерфейсу на персональный компьютер (рис. 1).

Передача данных осуществлялась по беспроводному протоколу связи через Bluetooth в соответствии с выбранной конфигурацией, работающему на частоте 2.4 ГГц. Связь осуществлялась через USB-донгл, который подключается к компьютеру и обеспечивает устойчивую передачу данных на расстоянии до 10–15 метров.

В работе использовалась система сухих электродов совместно с OpenBCI шлемом Ultracortex Mark IV, что позволило осуществлять сбор сигналов ЭЭГ без применения гелей или других контактных веществ, и, таким образом, упростить эксплуатацию и повысить удобство пользователя (рис. 2).



Рис. 2. Модель шлема Ultracortex Mark IV

Потоковая передача данных ЭЭГ по протоколу Lab Streaming Layer (LSL)

Для организации синхронизированной передачи биосигналов использовался протокол Lab Streaming Layer (LSL), обеспечивающий высокоточную временную привязку данных от различных источников. LSL был выбран для того, чтобы обеспечить одновременную регистрацию нескольких потоков (ЭЭГ, маркеров стимулов и видео) с точной синхронизацией.

OpenBCI поддерживает протокол LSL как через GUI-интерфейс, так и через сторонние скрипты и библиотеки на Python. Интеграция с таким инструментом, как BCILAB, позволило построить комплексный экспериментальный сценарий и встроить данные ЭЭГ в лабораторную систему анализа данных [4].

Для анализа данных ЭЭГ была разработана программа TestRegistrarEEG, которая осуществляет визуализацию и анализ данных ЭЭГ. Данные в программу TestRegistrarEEG поступают по протоколу LSL в режиме реального времени (рис. 3).

Применение ИИ для фильтрации и анализа сигналов ЭЭГ

Использование алгоритмов искусственного интеллекта, включая глубокие нейронные сети (CNN, LSTM), автоэнкодеры и обучающиеся фильтры, даёт возможность значительно повысить качество обработки ЭЭГ-сигналов. Такие подходы позволяют эффективно устранять артефакты,

улучшать выделение признаков и адаптироваться к индивидуальным особенностям пациента [3].

Все источники сигналов ЭЭГ синхронизировались через протокол LSL, обеспечивая точное совмещение временных рядов для последующего обучения модели. На этапе предварительной обработки производилась полуавтоматическая разметка участков сигнала, содержащих артефакты движения, с использованием статистических критериев (амплитуда, резкие градиенты) и визуального анализа. На размеченных данных обучалась нейросетевая модель, задача которой – выделить артефактные компоненты и восстанавливать чистый сигнал. Для решения этой задачи в работе использовалась сверточная нейронная сеть (CNN) на основе архитектуры DeepConvNet [6]. Результатом работы модели было выделение артефактных компонентов и восстановление чистого сигнала ЭЭГ в реальном времени. Это позволило существенно повысить качество анализа ЭЭГ в лабораторных условиях.

Заключение

Интеграция беспроводных нейроинтерфейсов на базе OpenBCI с протоколом LSL и алгоритмами искусственного интеллекта даёт возможность создания мобильных, автономных и интеллектуальных систем мониторинга нейроактивности. Такие решения актуальны для задач телемедицины, нейрореабилитации, нейромаркетинга и управления техническими системами в режиме реального времени.

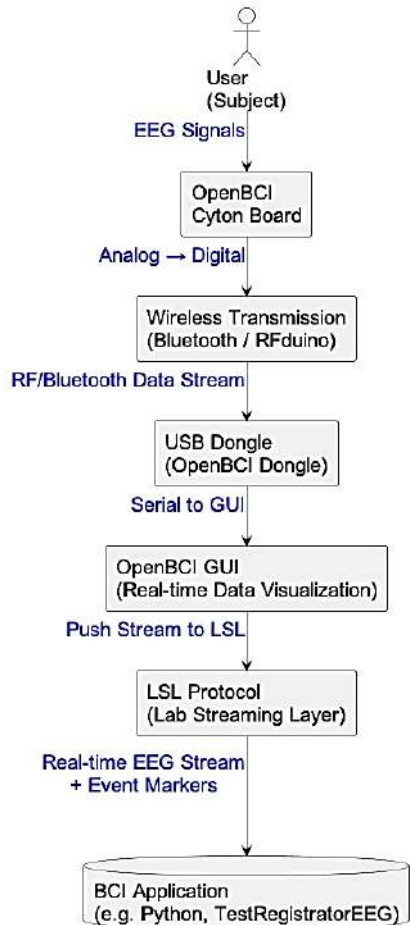


Рис.3. Поток данных: OpenBCI в GUI через LSL

В рамках научного исследования планируется использовать эти технологии для увеличения точности регистрации сигналов ЭЭГ, расширение применений нейроинтерфейса в условиях двигательной активности и более глубокую персонализацию взаимодействия с пользователем. Также планируется использовать технологию OpenBCI совместно с шлемом виртуальной реальности для видео-стимуляции, аудио-стимуляции и изучения реакцию пользователя на звуковые и световые стимулы с использованием сигналов ЭЭГ.

Литература

1. Ивличев Е.П., Сидоров С.Г. Анализ данных ЭЭГ, полученных на сухих электродах и минимизация артефактов методами искусственного интеллекта // Энергия-2024. Т.5. Иваново: ИГЭУ, 2024.
2. OpenBCI. Официальный сайт. URL: <https://openbci.com/>
3. Roy Y. et al. Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review. Journal of Neural Engineering, 16(5), 051001, 2019.
4. Kothe C. Lab Streaming Layer (LSL). GitHub Repository. <https://github.com/sccn/labstreaminglayer>
5. OpenBCI Docs. <https://docs.openbci.com/>
6. Schirrneister R.T., Springenberg J.T., Fiederer L.D.J. et al. Deep learning with convolutional neural networks for EEG decoding and visualization. Human Brain Mapping, 2017, 38(11), pp. 5391–5420. <https://doi.org/10.1002/hbm.23730>

УДК 007.51

Д.В. БЛУВШТЕЙН

Управление Федерального казначейства по Костромской области,
156961, г. Кострома, ул. Красноармейская, 8
E-mail: bluvshteindv@gmail.com

Машины вывода на базе семантических сетей фреймоподобного вида

Аннотация. Рассмотрены машины вывода для обработки данных, правил, находящихся в семантических сетях фреймоподобного вида. Вводимый запрос указывает объекты, содержащиеся в эксплуатационной схеме организации, которые подлежат ремонту. Полученный запрос переформулируется с целью замены конкретных наименований, на обобщенные наименования. В абстрактной семантической функциональной сети фреймоподобного вида содержатся правила, содержащие обобщенные наименования, которые предварительно создаются с помощью нейронных сетей. Семантическая каузальная сеть фреймоподобного вида содержит информацию по правилам обработки эксплуатационной схемы с целью безопасного отключения в виде списков нулевого уровня. Машина вывода конкретной семантической функциональной сети фреймоподобного вида формирует конечный документ, являющийся типовым бланком переключений.

Ключевые слова: Машины вывода, семантические сети фреймоподобного вида, правила, запрос, списки нулевого уровня, база данных.

D.V. BLUVSHTEIN

Federal Treasury Departments for the Kostroma region,
156961 Kostroma, Krasnoarmeiskaj 8
E-mail: bluvshteindv@gmail.com

Output machines based on semantic networks of a frame-like form

Abstract. Output machines for processing data, rules in semantic networks of a frame-like form are considered. The input query indicates the objects contained in the operational scheme of the organization that are subject to repair. The received request is reformulated in order to replace specific names with generalized names. An abstract semantic functional network of a frame-like form contains rules containing generalized names that are previously created using neural networks. The frame-like semantic causal network contains information on the rules for processing the operational scheme in order to safely disable in the form of zero-level lists. The output machine of a specific semantic functional network of a frame-like form generates a final document, which is a typical switching form.

Key words: Output machines, semantic networks of a frame-like form, rules, query, zero-level lists, database.

В работе рассматриваются машины вывода (МВ) обрабатывающие семантические сети фреймоподобного вида (СемСФрВ). Назначение МВ обработка данных, правил, находящихся в СемСФрВ. Взаимодействие друг с другом с целью получения промежуточных и конечных решений. Семантические сети фреймоподобного вида предназначены для описания объектов, процессов, предметов любой природы.

Семантическая сеть управления фреймоподобного вида другими семантическими сетями фреймоподобного вида (СемСУС) предназначена для управления и передачи регулирующей информации при взаимодействии СемСФрВ.

МВ – это программа. Для каждой СемСФрВ должна быть конкретная МВ. Она должна быть устроена так, чтобы в режиме интерпретации могла обрабатывать данные, хранящиеся в СемСФрВ. Она должна взаимодействовать с другими МВ.

Вводится запрос с помощью МВ для семантической сети диалога фреймоподобного вида (МВСД) в виде следующего текста: **«Создать бланк оперативных переключений вывода в ремонт ТП-144 (для ремонта Т-1, Р-1 10 кВ)»**, являющийся запросом первого уровня. Этот запрос передается МВ для семантической сети задачи фреймоподобного вида (МВСЗ), которая размещает полученную информацию в семантической сети задачи фреймоподобного вида (СемСЗ). При этом этот запрос

разбивается на семантические единицы в виде синтаксических конструкций и размещаются в соответствующих слотах.

В запросе указываются объекты, содержащиеся в эксплуатационной схеме организации, которые подлежат ремонту. Для нахождения нужных правил по проведению ремонтных работ необходимо преобразовать наименования объектов, привязанных к схеме в обобщенные наименования. Это связано с тем, что правила проведения ремонта, хранящиеся в базах знаний, используют обобщенные наименования. Поэтому полученный запрос переформулируется с целью замены конкретных наименований, использующихся в этой организации к запросу, содержащему обобщенные наименования. Для этого МВСЗ обращается к МВ семантической сети графических объектов фреймоподобного вида (МВСГО) с передачей конкретных имен, содержащихся в запросе первого уровня. В запросе могут содержаться понятия, которые непосредственно невозможно формализовать таким образом, чтобы использовать в машинах вывода, тогда необходимо использовать другие СемСФрВ. В результате переформулировки запрос будет выглядеть следующим образом: **«Создать бланк оперативных переключений вывода в ремонт ТП-144 (для ремонта трансформатора напряжения, разъединителя 10 кВ)»**, являющийся запросом второго уровня, который размещается в БД запросов второго уровня (БД32).

В абстрактной семантической функциональной сети фреймоподобного вида (АСемФС) содержатся правила, содержащие обобщенные наименования, которые предварительно создаются с помощью нейронных сетей, получающихся путем обработки текстов нормативов в ГОСТах и руководящих документах.

В запросе второго уровня выделяются обобщенные наименования и по ним осуществляется поиск правил проведения ремонтных работ с помощью МВ для АСемФС (МВАФС). Найденные правила помещаются в конкретную семантическую функциональную сеть фреймоподобного вида (КСемФС) с помощью следующей схемы управления: МВАФС → МВСУС → МВКФС, где МВСУС – МВ для СемСУС, МВКФС – МВ для КСемФС.

Семантическая каузальная сеть фреймоподобного вида (СемКаузС) содержит информацию по правилам обработки эксплуатационной схемы с целью безопасного отключения в виде списков нулевого уровня (СНУ)[1]. Сначала отключаются объекты-потребители энергии, затем отключаются объекты-поставщики энергии. После этого используются правила для проведения ремонта указанных в запросе объектов.

Конкретные правила проведения ремонтных работ появляются в результате сопоставления обобщенных правил с объектами схемы и конкретизации этих правил для найденных объектов. В запросе второго уровня из группы объектов при сопоставлении со схемой выделяются два граничных объекта. Работа с СемСГО осуществляется с помощью

МВСГО, которой передается значение какого-либо слота СНУ. Из запроса второго уровня передаются обобщенные имена объектов. По этим именам, используя базу данных (БД) потребителей и поставщиков, а также СемСГО находятся объекты, непосредственно связанные с объектами-поставщиками и объектами-потребителями, так называемые граничные объекты. Формируются конкретные правила для каждого объекта-потребителя нижнего уровня, и они размещаются в КСемФС. После получения конкретных правил для всех объектов-потребителей по такому же принципу формируются правила для объектов-поставщиков. На основе которых создаются конкретные правила, размещаемые в КСемФС.

В результате сопоставления запроса второго уровня, информации в СемСГО, правил отключения в КСемФС создаются правила, содержащие два компонента: первый компонент – это синтаксически очищенное правило, взятое из АСемФС, второй компонент данных – это информация, извлеченная из СемСГО. Для получения конкретных правил требуется соединить эти блоки в одно целое и затем МВ КСемФС формирует конечный документ, являющийся типовым бланком переключений.

Литература

1. «Автоматизация и современные технологии» Блувштейн Д.В., Зубков В.П., «Семантические сети фреймоподобного вида, использующиеся в интегрированной системе» М.: Машиностроение, 2010 №8 – 27с.

СЕКЦИЯ 7.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И УСТАНОВКАМИ

УДК 621.316.1.05

Е. С. ПОДШИВАЛОВ, аспирант,
О. В. КРЮКОВ, д.т.н., зам. директора по науке,
И. В. ГУЛЯЕВ, д.т.н., профессор

ООО «ТСН-электро»,
603108, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, 7А,
Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева
430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68
E-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Моделирование электромеханических систем с преобразователями частоты и накопителями энергии

Аннотация. Рассмотрены проблемы моделирования распределенной генерации в системе электроснабжения электромеханических систем. Предложен подход повышения эффективности и надежности работы электроприводов с преобразователями частоты и накопителями электроэнергии.

Ключевые слова: электромеханическая система, трансформаторная подстанция, накопители электроэнергии, синхронный двигатель, генератор.

E.S. PODSHIVALOV, post-graduate student,
O.V. KRYUKOV, Doctor of Eng., Deputy Director of Science,
I.V. GULYAEV, Doctor of Eng., Professor

TSN-Electro LLC,
7A Elektrovoznaya str., Nizhny Novgorod, 603108,
N.P. Ogarev Mordovian State University
430005, Republic of Mordovia, Saransk, 68 Bolshevistskaya str.
E-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Electromechanical systems with frequency converters and energy storage

Annotation. The problems of introducing distributed generation into the power supply system of electromechanical systems are considered. An approach is proposed to increase the efficiency and reliability of electric drives with frequency converters and electric power storage devices.

Key words: electromechanical system, distributed generation, electric power storage, reliability, energy saving.

В настоящее время в России возросли темпы нового строительства и реконструкции объектов добычи, транспорта, переработки и подземного хране-

ния газа [1-3]. Это обусловлено ростом спроса на природный газ в развитых странах мира и планами создания магистральных газопроводов (МГ) из России в страны АТР, а также в Сибири и на Дальнем Востоке с освоением новых месторождений. Обеспечение стабильных поставок газа, снижение его энергоемкости и себестоимости напрямую связаны с модернизацией существующих электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС) и автономных генераторных комплексов (АГК) систем электроснабжения (СЭС) на базе цифровых подстанций (рис. 1) [4-6].



Рис. 1. Общий вид цифровой подстанции нового поколения

Основной машиной, используемой для привода компрессоров КС и в АГК, в частности, в ветроэнергетических установках (ВЭУ), является синхронная (СД и СГ), благодаря ее известным преимуществам [7-9]. Возможности расширения функциональных возможностей СД и СГ, улучшения их характеристик связаны с внедрением преобразователей частоты (ПЧ), накопителей электроэнергии (НЭ) [10-12] и новых программно-аппаратных средств управления на базе прикладных компьютерных моделей машины [13-15], необходимых для исследования различных режимов работы газотранспортных объектов.

В качестве примера в докладе приведен пакет MATLAB с приложением визуального моделирования Simulink, с библиотекой Sim Power Systems. В этих программных продуктах облегчен и ускорен процесс однократного синтеза блоков. Но при этом существует ряд недостатков – отсутствует возможность быстрого математического и модельного отхода от используемого ПО, усложняется процесс синтеза экспертной системы по выбору структуры, подбору параметров, а также синтезу САУ. Указан-

ный способ моделирования не всегда в полной мере отражает всю картину электромеханических процессов в системе с ПЧ и НЭ. Ряд продуктов ПО позволяет производить визуальное имитационное моделирование на низшем уровне, составлять модели-блоки на основе описания каждого элемента блока, а из готовых блоков собирать интересующую структуру. Элементы блоков моделируются в виде набора передаточных функций, математическими выражениями, а также простейшими дискретными элементами. Примером такого ПО служит пакет MATLAB с приложением визуального моделирования.

В докладе рассмотрены модели базовой структуры автономной ВЭУ и аналогичные модели для приводного синхронного электродвигателя ЭГПА с высоковольтными ПЧ, а также АГК с НЭ [16-18]. Данная модель позволяет проводить виртуальные эксперименты, получать динамические и статические характеристики процессов, протекаемых в базовой структуре, при изменении внутренних и внешних воздействий.

Анализ полученных данных показал, что использование гибридного регулятора вместо традиционной системы улучшает динамические процессы в системе с синхронными машинами и преобразователями.

Литература

1. Энергосбережение и автоматизация компрессорных станций // под ред. О.В. Крюкова – Нижний Новгород: Вектор ТиС, том 1, 2010. 560 с.
2. Захаров П.А., Крюков О.В. Системы автоматизации для эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности. 2008. №6. С. 6-10.
3. Гуляев И.В., Крюков О.В. Перспективы развития объектов ПАО «Газпром» // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. 2022. № 4 (50). С. 45-53.
4. Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В. Расширение возможностей КТП «Каскад» // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. № 12. С. 26-31.
5. Ипполитов В.А., Крюков О.В. Мониторинг и новые возможности РУ с НКУ «КАСКАД» // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 5 (275). С. 32-39.
6. Косоротов А.А., Крюков О.В. Функциональные возможности РУ цифровых подстанций // В сборнике: Фёдоровские чтения - 2021. С. 143-151.
7. Крюков О.В. Анализ моноблочных конструкций электрических машин для ГПА // Машиностроение: СЭНЖ. 2015. Т. 3. № 4. С. 53-58.
8. Kryukov O.V., Gulyaev I.V. Method for stabilizing of synchronous machines a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. Т. 90. № 7. С. 473-478.
9. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов // Приводная техника. 2010. № 5. С. 2-11.
10. Аникин Д.А., Крюков О.В., Киянов Н.В. Проектирование систем управления электроприводными ГПА // Газовая промышленность. 2009. № 2. С. 44-47.
11. Крюков О.В., Гуляев И.В. Повышение эффективности ЭГПА на базе ПЧ // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 45-50.
12. Подшивалов Е.С., Крюков О.В. Параметризация накопителей энергии на объектах АПК // В сборнике: XXII Бенардосовские чтения. 2023. С. 88-91.
13. Крюков О.В. Моделирование и реализация электромеханических систем // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. №3. С. 55-61.
14. Крюков О.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б. Моделирование процессов в синхронных электродвигателях // Контроль. Диагностика. 2020. № 4. С. 28-35.

15. Степанов С.Е., Васенин А.Б., Крюков О.В. Цифровое моделирование синхронных электрических машин при работе на турбокомпрессорную нагрузку // Наука и техника в газовой промышленности. 2020. № 4 (84). С. 84-90.

16. Гуляев И.В., Крюков О.В. Компьютерное моделирование мощного ЧРП объектов ТЭК // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2022. № 1 (150). С. 32-41.

17. Ипполитов В.А., Романов Л.Р., Крюков О.В. Подход к моделированию ЭМС и РЗА // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2023. № 10 (171). С. 16-25.

18. Подшивалов Е.С., Крюков О.В. Система с накопителями энергии // Электро-технологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71. № 1 (54). С. 31-39.

УДК 621.3:62-52-83

О.В. КРЮКОВ, д.т.н., зам. директора по науке,
А.Б. ВАСЕНИН, к.т.н., вед.инженер
С.Е. СТЕПАНОВ, к.т.н., вед.инженер

ООО «ТСН-электро», ООО «Газпром проектирование»,
603108, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, 7А,
E-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Возможности оптимизации работы электроприводов компрессорных станций магистральных газопроводов

Аннотация. Представлены потенциальные резервы повышения энергоэффективности электроприводов компрессорных станций магистральных газопроводов. Предложены проекты реализации экономичных приводов.

Ключевые слова: электропривод, распределительное устройство, оптимизация, энергосбережение.

O.V. KRYUKOV, Doctor of Eng., Deputy Directors of Science,
A.B. VASENIN, Ph.D., leading engineer
S.E. STEPANOV, Ph.D., leading engineer

TSN-Electro LLC (Nizhny Novgorod), Gazprom Design LLC,
7A Elektrovonnaya str., Nizhny Novgorod, 603108,
E-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Possibilities of optimizing the operation of electric drives of compressor stations of main gas pipelines

Annotation. Potential reserves for improving the energy efficiency of electric drives of compressor stations of main gas pipelines are presented. Projects for the implementation of economical drives are proposed.

Key words: electric drive, switchgear, optimization, energy saving.

В настоящее время в топливно-энергетическом комплексе России и, в частности, в газовой промышленности сложилась ситуация, выдвинувшая проблему энергосбережения наряду с надежностью на первый план [1,2]. Это связано с появлением новых электроэнергетических мощностей, комплектных трансформаторных подстанций (КТП) и распределительных

устройств (РУ) нового поколения (рис. 1) [3-6]. Одновременно каждый год вводилось в действие более 10 тыс. км газопроводов и компрессорных станций (КС) мощностью 2,0 млн. кВт и приростом добычи природного газа более 50 млрд. м³ [7,8].

Однако в период интенсивного развития газовой промышленности появилось оборудование, определяющее повышенную энергоемкость существующих газопроводов [9,10], сложившуюся при выборе их проектных параметров при чрезвычайно низких ценах на энергоресурсы и дефиците труб. Вследствие этого удельная энергоемкость российских магистральных газопроводов (МГ), отнесенная к объему товарно-транспортной работы, примерно на 50 % выше, чем западных аналогов.



Рис. 1. Общий вид блочных комплектных универсальных РУ на базе КСО-298

Однако удельный расход топливно-энергетических ресурсов на привод ГПА в течение многих лет снижается в связи с вынужденной разгрузкой газотранспортной сети [11,12]. Снижение нагрузки позволяет снизить удельные энергозатраты на 20 %, что свидетельствует об имеющихся резервах снижения энергозатрат на работу ГПА как основных потребителей энергоресурсов единой газотранспортной системой.

Газопроводы, вводимые в эксплуатацию в период интенсифицированной перекачки газа, часто не были оснащены системами телемеханики, а из-за возникшего дефицита запорной арматуры ее установка велась с увеличенным шагом. Кроме того, из-за отсутствия современной системы учета и контроля газа, а также из-за использования морально устаревшего оборудования на КС имеются потери природного газа, большая доля которых приходится на коммерческие потери, которые в газовых хозяйствах определяются исходя из относительной погрешности приборов учета 2,5-5 % (при мировой практике 0,25 %).

Основными направлениями энергосбережения, необходимыми для успешного развития системы газоснабжения, являются [13-15]:

- экономия ресурсов газа для его использования на собственные нужды станции или для подачи потребителям;
- повышение эффективности работы существующего парка ГПА за счет поиска и устранения мест неэффективного использования газа;
- снижение эксплуатационных издержек за счет оптимизации режимов работы основного и вспомогательного оборудования КС;
- совершенствование системы учета и контроля газа в газовом хозяйстве, приведение ее к международным стандартам;
- замена устаревшего оборудования на высокотехнологичное, имеющее высокий КПД и малое потребление энергоносителей;
- снижение выбросов газов и вредных веществ в атмосферу.

Первые три направления из вышеперечисленных могут быть реализованы с минимальными инвестиционными затратами путем системной оптимизации энергопотребления технологических агрегатов КС [16-18].

В докладе рассмотрены математические модели теплоэнергетической системы МГ, которые являются центральным звеном процедурного алгоритма оптимизации параметров энергопотребления на выходе с каждой КС. Решение определено алгоритмом прямого поиска возможных направлений, в основе которого лежит метод системной оптимизации, решающий нелинейные задачи с ограничениями типа неравенств.

Разработанный процедурный алгоритм и математические модели позволяют определять оптимальные термодинамические параметры компримируемого газа для любых современных КС.

Литература

1. Энергосбережение и автоматизация компрессорных станций // Под ред. О.В. Крюкова. Нижний Новгород: Вектор ТиС, 2010.
2. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов ГПА // В сб.: Труды VIII АЭП-2014 / Отв. И.В. Гуляев. Саранск, 2014. С. 157-163.
3. Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В. Расширение возможностей КТП «Каскад» // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. № 12. С. 26-31.
4. Ипполитов В.А., Крюков О.В. Мониторинг и новые возможности РУ с НКУ «КАСКАД» // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 5 (275). С. 32-39.
5. Косоротов А.А., Крюков О.В. Функциональные возможности РУ цифровых подстанций // В сборнике: Фёдоровские чтения - 2021. С. 143-151.
6. Ипполитов В.А., Крюков О.В. Арктические КТП-10/0,4 с функциями цифровой ПС // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2023. № 3 (164). С. 26-34.
7. Захаров П.А., Крюков О.В. Системы автоматизации для эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности. 2008. №6. С.6-10.
8. Крюков О.В., Гуляев И.В. Повышение эффективности ЭГПА на базе ПЧ // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 45-50.
9. Воронков В.И., Крюков О.В. Электроснабжение линейных потребителей газопроводов // Газовая промышленность. 2010. № 3 (643). С. 32-37.
10. Крюков О.В. Анализ факторов энергоэффективности инновационных решений в ЭГПА // Автоматизация в промышленности, 2010, № 10, с. 50-53.

11. Милов В.Р., Крюков О.В. Интеллектуализация управленческих решений в газовой отрасли // Автоматизация в промышленности, 2009, № 12, с.16-20.
12. Пужайло А.Ф., Крюков О.В. Энергосбережение в агрегатах КС средствами ЧРП // Наука и техника в газовой промышленности. 2012. №2. С. 98-106.
13. Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные системы электроприводов нефтегазопроводов // В сборнике: Труды IX АЭП-2016. С. 380-384.
14. Крюков О.В., Гуляев И.В. Энергосберегающие алгоритмы электропривода транспорта газа // Изв. ВУЗов. Электромеханика. 2021. № 4-5. С. 24-29.
15. Khlynin A.S., Kryukov O.V., Stepanov S.E. Energy optimization of gas compressor units electric drives // В книге: Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 137-139.
16. Крюков О.В. Оптимальное управление процессом транспорта газа // В сборнике: XII Всерос. совещание ВСПУ-2014. ИПУ РАН. 2014. С.4602-4613.
17. Васенин А.Б., Крюков О.В. Техничко-экономический анализ эффективности АВО // В сборнике: Великие реки' 2019 научного конгресса. С. 54-57.
18. Kryukov O., Gulyaev I. Optimize of parallel operation several electric driven gas pumping units // В сборнике: Proc. 3rd SUMMA 2021. С. 1070-1074.

УДК 621.311.23

А.Б. ВИНОГРАДОВ¹, д.т.н., науч. руководитель,
Р.О. ГОРЕЛКИН², аспирант, учебный мастер,
А.С. ГЕРАСИМОВ², аспирант

¹Научно-технический центр электропривода «Вектор»,
153021 г. Иваново, ул. Лебедева-Кумача, 2а, офис 207.

²Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34.

E-mail: info@vectorgroup.ru¹, roman.gorelkin.96@mail.ru², gerasimov_as@neurosoft.ru²

Разработка многофункционального лабораторного стенда для исследования инновационных решений при построении автономных станций электроснабжения

Аннотация. Статья посвящена разработке многофункционального стенда для исследования инновационных решений при построении автономных станций электроснабжения. Показана практическая значимость таких станций электроснабжения. Выделяются и описываются составные элементы стенда, а также его функциональные возможности.

Ключевые слова: автономная станция электроснабжения, ДВС, экономия энергии, асинхронный генератор, лабораторный стенд.

A.B. VINOGRADOV¹, doctor of technical sciences, research leader,
R.O. GORELKIN², graduate student, educational master of the department
of Electric drive and automation of industrial plants.
A.S. GERASIMOV² graduate student.

¹Electrical Drive Research and Technical Center "Vector"
2a Lebedeva-Kumacha St., 2a, office 207, Ivanovo, 153021

²Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskay St., 34,

E-mail: info@vectorgroup.ru¹, roman.gorelkin.96@mail.ru², gerasimov_as@neurosoft.ru²

Development of a multifunctional laboratory stand for research of innovative solutions in the construction of autonomous power stations power supply

Annotation. The article is devoted to the development of a multifunctional stand for the study of innovative solutions in the construction of autonomous power supply stations. The practical significance of such power supply stations is shown. The components of the stand, as well as its functionality, are highlighted and described.

Key words: autonomous power supply station, internal combustion engine, energy saving, asynchronous generator, laboratory stand.

Автономные станции электроснабжения (АСЭ) [1,2,3] широко востребованы как источники электроэнергии на объектах малой и средней мощности, удаленных от централизованных электросетей, в качестве резервных источников электроэнергии на случай временного сбоя в централизованном электроснабжении, в качестве источников энергии мобильной техники. При использовании в качестве первичного источника механической энергии двигателя внутреннего сгорания (ДВС) целесообразным с точки зрения повышения суммарного коэффициента полезного действия (КПД) системы и снижения ее эксплуатационных расходов является применение систем, допускающих работу с переменной частотой вращения ДВС. Это позволяет регулировать скорость генератора в зависимости от мощности нагрузки АСЭ, обеспечивая работу ДВС на характеристике максимальной топливной эффективности и за счет этого экономить топливо в условиях сильно изменяющихся нагрузок [4]. Другим важным фактором является стоимость АСЭ. По этому показателю определенное преимущество имеют системы, в которых через полупроводниковый преобразователь передается только часть энергии, циркулирующей между первичным приводом и нагрузкой [5]. По совокупности обладания двумя вышеуказанными свойствами в качестве одного из наиболее целесообразных вариантов построения АСЭ может быть выбрана электростанция на основе асинхронного генератора с фазным ротором. Для экспериментального исследования алгоритмов управления АСЭ с преобразователями малой мощности и асинхронными генераторами с фазным (АГФР) и короткозамкнутым (АГКЗ) ротором разрабатывается специализированный лабораторный стенд. Данный стенд должен позволять построить АСЭ на основе АГФР и дополнительно иметь возможность переконфигурирования его для исследования АСЭ на основе АГКЗ.

Функциональная схема стенда включает в себя две соединенные вместе электромашины - асинхронный электродвигатель (генератор) с короткозамкнутым ротором (М1) и асинхронный электродвигатель (генератор) с фазным ротором (М2). При исследовании построения АСЭ на базе АГФР стенд работает по схеме, показанной на рис. 1, а при построении АСЭ на базе АГКЗ стенд работает по схеме, показанной на рис. 2. При этом одна из электрических машин выполняет роль приводного ДВС, являясь гонным

двигателем, а вторая выступает в роли генератора АСЭ. Для питания гонного двигателя применяется внешний преобразователь частоты, питающийся от сети 0.4 кВ. В качестве нагрузки генератора может использоваться эта же сеть 0.4 кВ, подключаемая к выходу АСЭ контакторами КМ1.3 через фильтр (не показан). Это позволяет оптимизировать потери энергии при испытаниях, а также иметь возможность исследовать разнообразные режимы работы АСЭ, значительно снижая затраты на испытательное оборудование. Так же на рис. 1–2 не показаны датчики тока и напряжения в системе, блоки первоначальной зарядки конденсаторов звена постоянного тока и питания СУ, индуктивно-емкостные фильтры, супрессоры напряжения для защиты полупроводниковых приборов, набор контакторов с ручным управлением для выбора режима работы АСЭ между АГКЗ и АГФР.

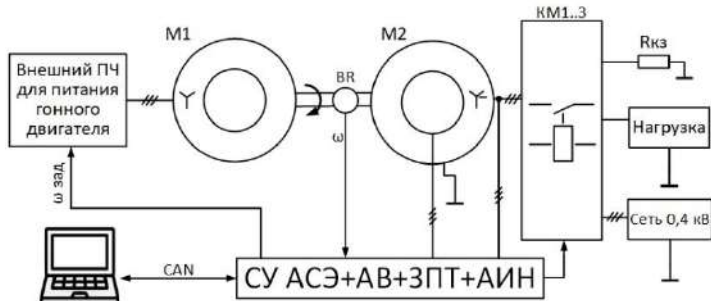


Рис. 1. Функциональная схема стенда исследования АСЭ с АГФР

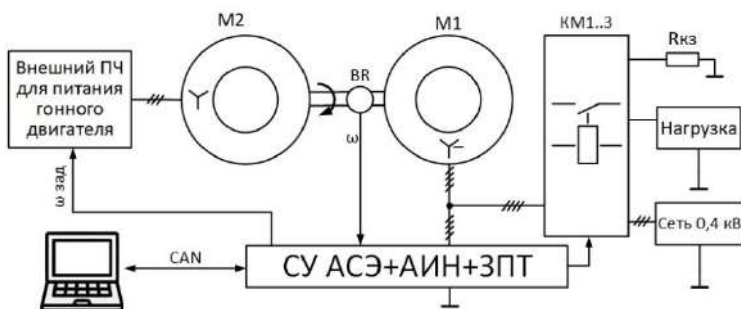


Рис. 2. Функциональная схема стенда исследования АСЭ с АГКЗ.

Также функциональная схема стенда включает в себя трехфазный мостовой активный выпрямитель (АВ) на IGBT, питаемый с выхода АСЭ, трехфазный мостовой инвертор напряжения (АИН), звено постоянного напряжения (ЗПТ), содержащее конденсаторы емкостного фильтра и

транзисторный ключ управления балластным резистором (опционально), систему управления (СУ) АСЭ. Для управления стендом и сбора информации о параметрах его работы он подключен к персональному компьютеру (ПК) посредством CAN шины.

Стенд обеспечивает следующие варианты формирования нагрузки АСЭ:

- *совместно с сетью* – в качестве симметричной нагрузки выступает сеть 0,4 кВ, что позволяет рекуперировать энергию и легко симулировать любой коэффициент мощности нагрузки.

- *автономно* – локальная, в общем случае несимметричная нагрузка, которая не связана с сетью, что предполагает возможность существенно изменения напряжения по фазам и частоты напряжения в нагрузке.

Также стенд позволяет исследовать применение различных архитектур СУ АСЭ и алгоритмов управления – в зависимости от количества включенных в контур управления датчиков тока и напряжения, схемы построения силовой части (активный или пассивный выпрямитель в цепи ротора АДФР), наличия/отсутствия разрядного модуля в ЗПТ.

Стенд обеспечивает возможность исследования как рабочих, так и аварийных режимов функционирования АСЭ, в их числе:

- отказ отдельных датчиков в контуре СУ АСЭ;
- короткие замыкания в нагрузке в автономном режиме (с помощью контактора КМ1 осуществляется имитация короткого замыкания в нагрузке: -одно-, двух-, трехфазное КЗ в зависимости от подключенных на его выходе сопротивлений $R_{кз}$);
- ступенчатый сброс/наброс как симметричной, так и несимметричной нагрузки, переходные процессы в разных фазах;
- переходные процессы в АСЭ с учетом физического моделирования динамических режимов работы ДВС.

Литература

1. Григораш О.В. Системы автономного электроснабжения: монография / О.В. Григораш, Н.И. Богатырев, Н.Н. Курзин; под ред. Н.И. Богатырева. Краснодар: Б/И, 2001, 333 с.
2. Хватов О.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: монография / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, И.С. Поляков; Нижегород. гос. техн. у-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. 172 с.
3. Виноградов, А.Б. Управление станцией автономного электроснабжения в составе транспортного средства / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, А.А. Коротков // Электричество. 2009. №9. С. 49–55.
4. A. B. Vinogradov, R. O. Gorelkin An Autonomous Power-Supply Station Based on an Asynchronous Generator with a Phase-Wound Rotor and a Low-Power Frequency Converter, Russian Electrical Engineering, 2023, Vol. 94, No. 11, pp. 875–882.
5. Виноградов, А.Б. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с КЗ ротором и преобразователя частоты пониженной мощности / А.Б. Виноградов // Труды XI международной (XXII всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2020). – Санкт-Петербург, 4-7 октября 2020 г. С. 80-86.

УДК: 621.33:622.3

А.Б. ВИНОГРАДОВ, д.т.н., профессор
А.А. КОРОТКОВ, к.т.н., доцент
К.К. ЕРМАКОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: nice.ermakov19@gmail.com

Разработка алгоритмов управления для электротрансмиссии карьерного самосвала

Аннотация. Рассматривается разработка алгоритмов системы управления электромеханической трансмиссии карьерных самосвалов грузоподъёмностью 90-240 тонн. Приведено описание работы адаптивной системы безопасного движения. Рассмотрен алгоритм управления силовыми элементами электротрансмиссии (чоппером левого и правого борта), обеспечивающий работу форсированной тормозной характеристики, алгоритм регулирования уровня загрузки двигателя внутреннего сгорания и алгоритм дерейтинга мощности синхронного генератора по температуре его обмотки.

Ключевые слова: Алгоритмы управления, карьерный самосвал, тяговый электропривод, система управления.

A.B. VINOGRADOV, Doctor of Engineering, professor
A.A. KOROTKOV, Ph.D. of Engineering, associate professor
K.K. ERMAKOV, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: nice.ermakov19@gmail.com

Control algorithms for electromechanical transmission of heavy dump truck

Abstract. The development of control algorithms for the electromechanical transmission system of mining dump trucks with a payload capacity of 90–240 tons is considered. The principles of operation of the adaptive safe driving system are examined. The paper examines the control algorithm for the power components of the electric transmission (left and right side choppers), which ensures the implementation of the forced braking characteristic, the algorithm for regulating the load level of the internal combustion engine, and the power derating algorithm for the synchronous generator based on the temperature of its winding.

Key words: Control algorithms, dump truck, traction electrical drive, control system.

Введение. В современных условиях повышенной конкуренции на мировом рынке заявить о высоком спросе могут только производители самых надежных и эффективных карьерных самосвалов с электромеханической трансмиссией (ЭМТ). К производителям таких самосвалов относится ОАО «БЕЛАЗ». Оставаться в данном статусе ему позволяет постоянная разработка и интеграция новых эффективных алгоритмов

управления ЭМТ, за счет которых достигается повышение качества управления самосвалом при различных дорожных условиях, снижение эксплуатационных расходов. Преобладающие сейчас в разрезах самосвалы с тяговыми приводами постоянного тока уже не удовлетворяют современным требованиям по надежности, экономичности, качественным показателям движения [1]. Все рассмотренные в работе алгоритмы управления разработаны для современных ЭМТ переменного тока. Таким образом, в рамках обеспечения интеграции новых технологий в современную карьерную технику выполнена разработка новых алгоритмов как верхнего, так и нижнего уровней управления ЭМТ карьерных самосвалов грузоподъемностью 90-240 тонн, позволяющих повысить конкурентоспособность карьерных самосвалов «БЕЛАЗ» как на внутрироссийском, так и на мировом рынке.

Карьерные самосвалы работают преимущественно в тяжёлых дорожных и климатических условиях. Например, грязь, сырая глина, гололёд. А также наиболее частые и сложные режимы работы, с точки зрения работы ЭМТ - спуски и подъёмы в гору. В таких условиях эксплуатации система управления самосвалом должна отвечать следующим условиям: быть адаптивной, обеспечивать устойчивость и безопасность движения, сохранять управляемость вне зависимости от внешних условий. Выполнение требований обеспечено за счет организации системы безопасного движения, основанной на алгоритмах управления верхнего уровня: алгоритм антиблокировки (ABS), алгоритм антипробуксовки (ASR), а также алгоритм курсовой устойчивости (ESP). В процессе эксплуатации карьерных самосвалов с ЭМТ переменного тока был выявлен основной недостаток в работе штатной системы безопасного движения - отсутствие ее адаптивности к изменению сцепления колеса с дорожным полотном [2].

Выполнена разработка новых алгоритмов адаптивной системы ABS/ASR, обеспечивающих скольжение колеса в допустимом диапазоне при любых дорожных условиях. Для этого в систему управления дополнительно заведена информация с датчиков скорости вращения передних колёс, по которым определяется линейная скорость самосвала. Как альтернатива, предусмотрено получение информации о скорости линейного движения машины от инерциальной системы измерения линейных ускорений блока контролера управления верхнего уровня (КВУ) [3]. В качестве недостатков последнего канала получения данных можно выделить: средняя точность измерения устройства; значительное искажение данных при высокой температуре и влияние рельефа местности по которому выполняется движение на точность измерений. К преимуществам относятся: низкая стоимость и простота интеграции. Разработанные алгоритмы адаптивной системы ABS/ASR прошли апробацию на стендовом оборудовании, проверены в процессе ходовых испытаний и рабочей эксплуатации карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн. Новая система на основе датчиков передних колес показала эффективность

торможения на скользкой дороге, повысила качественные показатели управления, надежность оборудования, а также исключила основной недостаток штанной системы.

Помимо алгоритмов верхнего уровня выполнена разработка и тестирование управления силовыми элементами. В ходе эксплуатации, при движении груженого самосвала под уклон (спуск с плеча) были зафиксированы колебания уровня напряжения в звене постоянного тока при торможении, вызывающие срабатывания защит системы управления с последующей блокировкой звена. Переход на алгоритм релейного управления чоппером снизил пульсации напряжения в звене, тем самым повысил эффективность торможения (тормозную характеристику) и диапазон предельного использования тормозных резисторов [4]. Работа на пределе форсированной характеристики позволяет развивать тормозную мощность ЭМТ 90-тонного самосвала до 1 МВт на каждый борт.

Реализованы алгоритмы адаптивного управления двигателем внутреннего сгорания (ДВС) через цифровой канал коммуникации (регулятор загрузки ДВС). Обмен данными КВУ с ДВС по прямому каналу с обратной связью позволило организовать эффективное управление отбором мощности, в частности алгоритм дерейтинга (от англ. derating) мощности синхронного тягового генератора по температуре его обмотки. Работа дерейтинга позволила снизить влияние внешних климатических факторов на работу основных элементов ЭМТ (эксплуатация самосвала при высокой температуре окружающей среды).

Представленные в работе алгоритмы, успешно прошли все этапы тестирования и интеграции в систему управления ЭМТ карьерных самосвалов. Выполнено масштабирование алгоритмов управления на всю линейку ЭМТ карьерных самосвалов грузоподъемностью от 90 до 240 тонн.

Литература

1. Казубенко, А.Ф. Применение электромеханической трансмиссии на карьерных самосвалах БЕЛАЗ / А.Ф. Казубенко // Горная промышленность. 2018. № 6(142). С. 21.
2. Виноградов, А.Б. Алгоритмы управления карьерным самосвалом при проскальзывании колес / А.Б. Виноградов, А.А. Коротков, К.К. Ермаков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. № 5. С. 68-73. DOI 10.17588/2072-2672.2023.5.068-073. EDN BBIGSR.
3. Ермаков, К.К. Инерциальная система измерения линейных ускорений и угловых скоростей карьерного самосвала / К.К. Ермаков, Е.С. Коровина // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 29 февраля – 02 марта 2024 года. Москва: Общество с ограниченной ответственностью Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2024. С. 517. EDN ККНААТ.
4. Виноградов А.Б. Алгоритмы управления и технические решения в тяговом электроприводе карьерных самосвалов / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, В.Л. Чистосердов [и др.] // Электричество. 2023. № 2. С. 60-68. DOI 10.24160/0013-5380-2023-2-60-68. EDN RPJCPO.

УДК 62-83:621.313.2.077

С.К. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,
А.Р. КОЛГАНОВ, д.т.н., профессор,
М.С. КУЛЕНКО, к.т.н., доцент

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

E-mail: zerg.lebedev@mail.ru, klgn@drive.ispu.ru, forestgummy@gmail.com

Настройка на полиномы Бесселя и Ньютона в мехатронных модулях с формированием траектории позиционирования

Аннотация. Исследование посвящено анализу фиксированных настроек динамики при формировании траектории в условиях изменения инерционности механики. Даны рекомендации по выбору для настройки полиномов Бесселя или Ньютона.

Ключевые слова: мехатроника, электропривод, синтез систем управления, позиционирование.

S.K. LEBEDEV, Candidate of Engineering, associate professor,
A.R. KOLGANOV, Doctor of Engineering, professor,
M.S. KULENKO, Candidate of Engineering, associate professor

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

E-mail: zerg.lebedev@mail.ru, klgn@drive.ispu.ru, forestgummy@gmail.com

Tuning to Bessel and Newtonian polynomials in mechatronic modules with positioning path formation

Abstract. The study is devoted to the analysis of fixed dynamics settings during the formation of a trajectory under conditions of changes in the inertia of mechanics. Recommendations for choosing to tune Bessel or Newtonian polynomials are given.

Key words: mechatronics, electric drive; control system, positioning.

Мехатронные модули (ММ) на базе автоматизированного электропривода в промышленных манипуляторах и станках осуществляют управление движением механических элементов.

Современный электропривод позволяет применять при синтезе ММ структуру (рис. 1), где объект управления – механика с инерционным коэффициентом k_{in} и контуром момента (КМ) с параметрами k_m, T_m [1]. ММ с регулятором положения (РП) должен реализовать задание q_f в условиях действия нагрузок Q_L и изменения k_{in} . Задание на перемещение q_f поступает от функционального блока – формирователя траектории (ФТ). Блок входного фильтра W_f участвует в формировании динамики движения. Авторы предлагают использовать в ММ статические и аста-

тические регуляторы (рис. 2) в зависимости от вида нагрузок [2]. ПИД-регуляторы обеспечивают определенную автономность движения элементов механизма при позиционировании и робастность в условиях вариации параметров (инерционности).

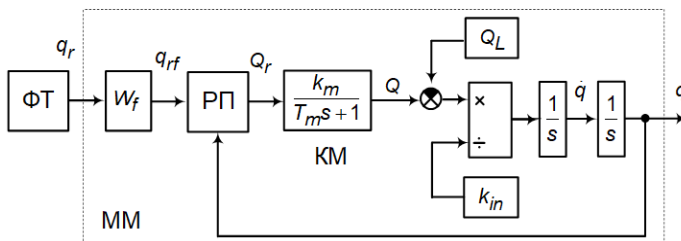


Рис. 1. Структура ММ

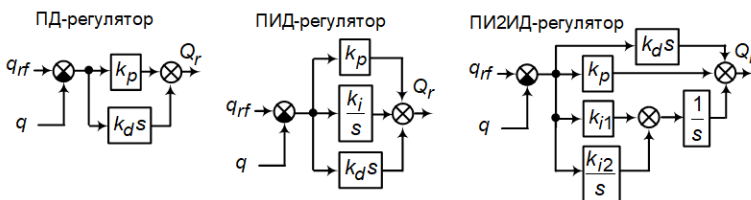


Рис. 2. Структуры РП

В системах позиционирования при синтезе регуляторов используют как эталон динамики:

- полиномы Ньютона, дающие нулевое перерегулирование;
- полиномы Бесселя, обеспечивающие минимальное искажение сигнала задания.

В [2] рассмотрено позиционирование ММ, синтезированных без учета инерционности КМ, при ступенчатом задании положения, получены характеристика и сделана оценка робастности при фиксированной настройке на максимум инерционности. И так как используются полиномы Бесселя и Ньютона, нормированные по полосе пропускания [1], то различие в характеристиках ММ минимальны.

Рассмотрим процессы в ММ при формировании траектории позиционирования с заданием положения и скорости движения, режим, который используют в системах управления движением звеньев манипулятора для ограничения скорости и завершения движения звеньев в одно время [1]. Регуляторы положения в эксперименте синтезированы с пренебрежением инерционности КМ и настроены на максимум k_{in} , структура модели

соответствует рис. 1. Задаем полосу пропускания $f_{bp}=10$ Гц, скорость движения – 1 рад/с, задание положения – 1 рад. Параметры ММ и звена манипулятора: $T_m=0,001$ с, $k_m=1$, $k_{inmax}=1,0$ кг·м², $k_{inmin}=0,02$ кг·м². На рис. 3 показаны начало и завершение по заданной траектории ММ с ПИД-регулятором для настроек на полиномы Бесселя и Ньютона. Обе настройки обеспечивают монотонность процесса и соответствие заданной скорости движения, но имеет место временное запаздывание.

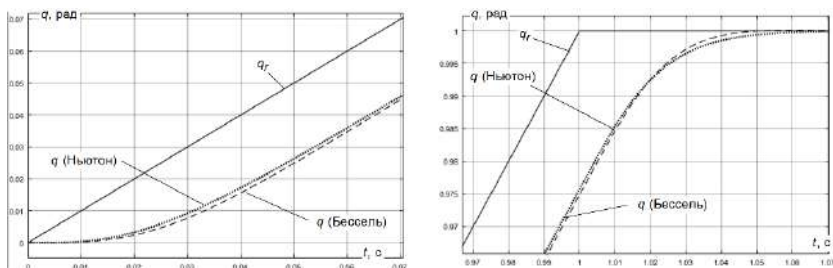


Рис. 3. Позиционирование с ПИД-регулятором

Входные фильтры регуляторов с передаточной функцией (ПФ) W_f обеспечивают компенсацию нулей ПФ по управлению системы позиционирования, что дает при ступенчатом задании характеристики, определяемые полиномами Ньютона или Бесселя [1,2]. При позиционировании с заданной скорости имеет смысл рассмотреть отключение фильтра. На рис. 4 приведены характеристики времени группового запаздывания –

$$t_{gz} = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega};$$

с отключением фильтра, $\varphi(\omega)$ – ФЧХ системы позиционирования по управлению.

Отключение входного фильтра эффективно снижает запаздывание в значительной части полосы пропускания, что и демонстрируют результаты моделирования процесса позиционирования ММ с ПИ-регулятором, показанные на рис. 5. Позиционирование с отключением входного фильтра происходит (рис. 5) с соблюдением заданной скорости позиционирования, без потери быстродействия, завершение происходит с незначительным переулированием (табл. 1). Оценим эффективность отключения фильтра с позиции сохранения робастных свойств ММ при фиксированной настройке регуляторов на максимум k_{in} . Процесс позиционирования при 50-и кратном изменении k_{in} в ММ с ПИД-регулятором показан на рис. 6. Здесь

имеем существенное снижение перегулирования и времени регулирования при изменении k_{in} от максимума до минимума.

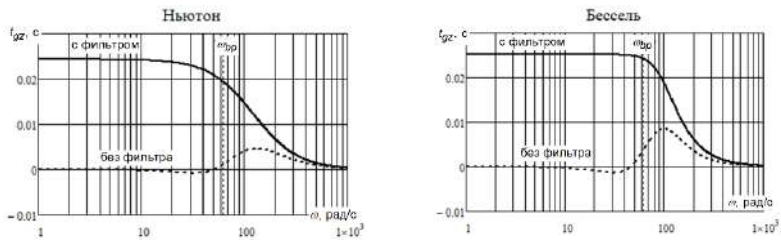


Рис. 4. Время группового запаздывания

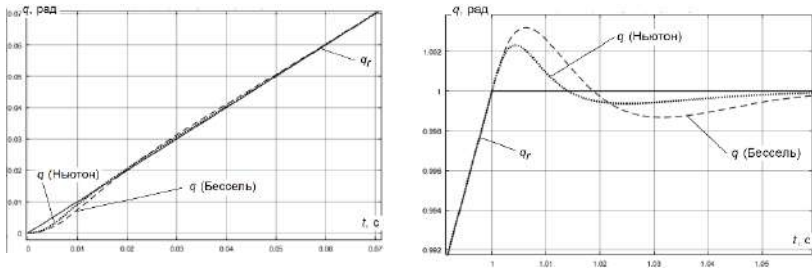


Рис. 5. Позиционирование с ПИД-регулятором без фильтра

Таблица 1. Перегулирование (%) при отключении фильтра

	ПД	ПИД	ПИЗИД
Ньютон	0,41	0,23	0,15
Бессель	0,54	0,32	0,20

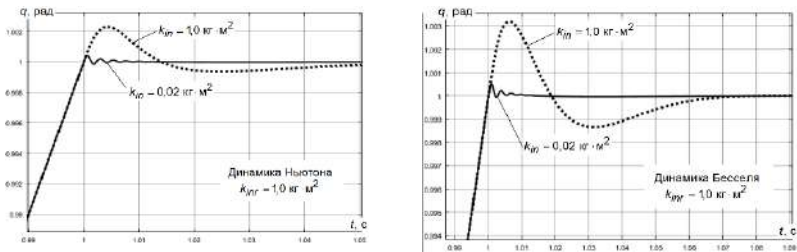


Рис. 6. Вариация параметра при фиксированной настройке

Вывод: на основании изложенного можно рекомендовать к использованию при позиционировании звеньев манипуляторов с заданием скоро-

сти отключение входного фильтра и настройку динамики на полином Ньютона, нормированный по полосе пропускания.

Литература

1. **Лебедев, С.К.** Кинематика и динамика электромехатронных систем в робототехнике / С.К. Лебедев, А.Р. Колганов. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 352 с.

2. **Лебедев, С.К.** Регуляторы положения для модулей позиционирования промышленных манипуляторов / С.К. Лебедев, А.Р. Колганов, М.С. Куленко // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XXII Бенардосовские чтения): сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф.; 31 мая – 2 июня 2023 г., III том, Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2023. С. 109-113.

УДК 681.586

А.Н. ШИРЯЕВ, к.т.н.,
Д.Е. СТЕПАШКИН, магистрант

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

Моделирование процесса заряда конденсатора фильтра силового преобразователя электропривода

Аннотация. В работе приведены математические модели и результаты исследования процесса заряда конденсатора фильтра силового преобразователя электропривода.

Ключевые слова: конденсатор фильтра, электропривод, модели в Matlab, результаты моделирования.

A.N. SHIRYAEV, Candidate of Engineering,
D.E. STEPASHKIN, master's student

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

Simulation of the Charging Process of the Filter Capacitor in an Electric Drive Power Converter

Abstract. The paper presents mathematical models and research results of the charging process of the filter capacitor in an electric drive power converter.

Key words: filter capacitor, electric drive, Matlab models, simulation results.

Учебным планом программы бакалавриата по направлению подготовки ки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» с направленностью

(профилем) академический бакалавр 13.03.02:10 «Электропривод и автоматика» предусмотрена дисциплина «Системы управления электроприводов» (СУЭП), которая реализуется на электромеханическом факультете кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Преподавание дисциплины предусматривает выполнение курсового проекта на тему «Система управления электроприводом с широтно-импульсным транзисторным преобразователем» (СУЭП с ШИП).

В ходе проектирования закрепляются теоретические знания и приобретаются практические навыки по разработке электрических схем, расчету и выбору элементов силовой части и системы управления электропривода (ЭП), по разработке математических моделей СУЭП и исследованию установившихся и переходных режимов электропривода.

В плане развития курсового проекта в раздел проектирования силовой части ЭП предлагается ввести моделирование процесса заряда конденсатора фильтра звена постоянного напряжения в среде Matlab с использованием модели универсального моста Universal Bridge библиотеки блоков SimPowerSystems.

Модель Universal Bridge позволяет выбирать количество плеч моста (от 1 до 3), вид полупроводниковых приборов (диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью управляемые тиристоры, IGBT и MOSFET, шунтированные обратными диодами).

На рис. 1 приведена модель процесса заряда конденсатора фильтра от неуправляемого выпрямителя с однофазной мостовой схемой выпрямления, а на рис. 2 – график напряжения U_{C1} на конденсаторе фильтра C1 и график напряжения U_{R1} на зарядном резисторе R1, которое пропорционально току заряда конденсатора C1.

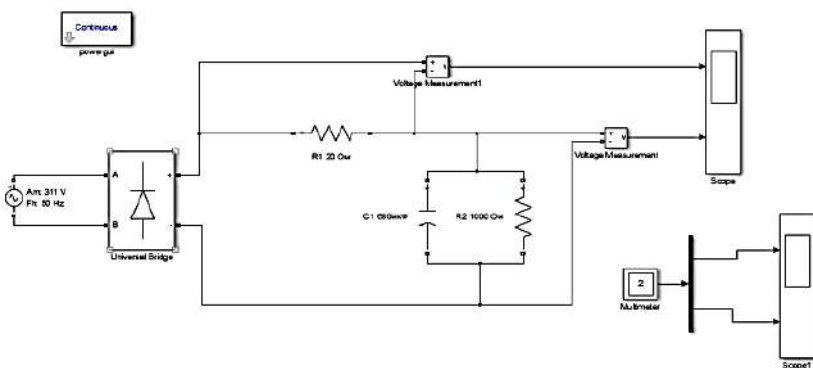


Рис.1. Модель процесса заряда конденсатора фильтра от выпрямителя с однофазной мостовой схемой выпрямления

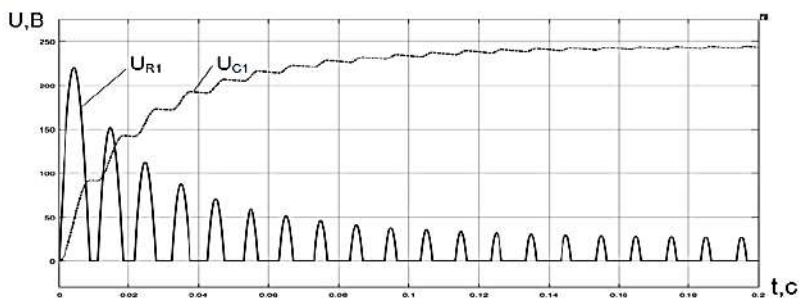


Рис. 2. Процесс заряда конденсатора фильтра от выпрямителя с однофазной мостовой схемой выпрямления

На рис. 3 приведена модель процесса заряда конденсатора фильтра от выпрямителя с трехфазной нулевой схемой выпрямления, а на рис. 4 – график напряжения на конденсаторе фильтра C1 и график напряжения на зарядном резисторе R1.

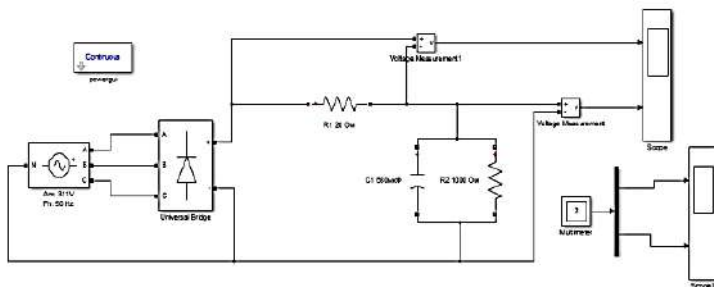


Рис. 3. Модель процесса заряда конденсатора фильтра от выпрямителя с трехфазной нулевой схемой выпрямления

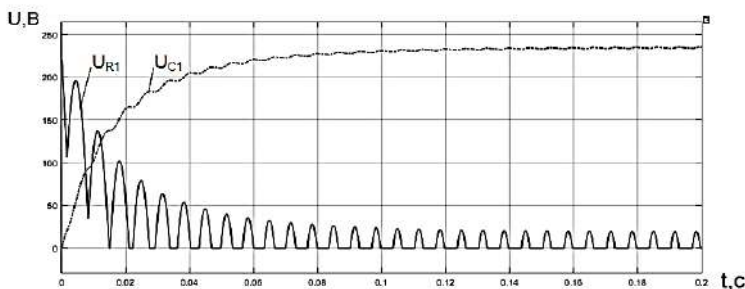


Рис. 4. Процесс заряда конденсатора фильтра от выпрямителя с трехфазной нулевой схемой выпрямления

Следует отметить, что в бестрансформаторных схемах питания ЭП постоянного тока с ШИП и двигателями с номинальным напряжением 220 В наиболее часто используют неуправляемый выпрямитель с однофазной или трехфазной схемами выпрямления.

Полученные студентами на основе моделей рис. 1 или рис. 3 графики процесса заряда конденсатора фильтра, аналогичные приведенным на рис. 2 и рис. 4, позволят студентам оценить величину и частоту пульсаций тока, время заряда конденсатора фильтра и проверить правильность расчета и выбора элементов звена постоянного напряжения.

УДК 62-83:681.5

П.В. ВИЛКОВ, к.т.н., доцент,
М.Д. ХУДЯКОВ, магистрант,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: wpw@inbox.ru, maksim.khudyakov.02@mail.ru

Лабораторный практикум по станкам с ЧПУ

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы разработки нового лабораторного практикума для изучения наладки, настройки и программирования обработки сложных изделий на металлорежущих станках с ЧПУ.

Ключевые слова: лабораторный практикум, металлорежущий станок, числовое программное управление

P.V. VILKOV, Candidate of Engineering, associate professor,
M.D. KHUDYAKOV, master's student,

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: wpw@inbox.ru, maksim.khudyakov.02@mail.ru

Laboratory workshop on CNC machines

Abstract. This article discusses the development of a new laboratory workshop for the study of commissioning, configuring and programming the processing of complex products on metal cutting CNC machines.

Key words: laboratory workshop, metal cutting machine, numerical control

В настоящее время современные металлорежущие станки с числовым программным управлением (ЧПУ) совмещают гибкость универсального и высокую производительность специального автоматического оборудования. Но, чтобы воспользоваться всеми преимуществами сложного оборудования с ЧПУ, необходимо представлять технологию подготовки управ-

ляющих программ, а также знать ее специфику под конкретные режимы работы.

При поддержке АО «Концерн РосЭнергоАтом» в ИГЭУ была создана лаборатория промышленной робототехники и мехатронных устройств. В лаборатории появилось современное оборудование, такое как манипулятор и металлорежущие станки с числовым программным управлением.

В связи с этим возникает потребность в разработке или обновлении методических указаний и пособий для обучающихся, выполняющих лабораторные работы по дисциплине «Электропривод и программное управление станками».

Таким образом, для подготовки специалистов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Электропривод и автоматика» разрабатывается новый лабораторный практикум, ориентированный на формирование теоретических знаний, практических умений и навыков наладки, настройки и программирования обработки сложных изделий на металлорежущих станках с ЧПУ.

Лабораторные работы практикума будут выполняться на фрезерно-гравировальном универсальном станке HY-6040 CNC (рис. 1) [1] с системой ЧПУ серии MNC800 [2] и станочным электроприводом серии MTDive [3].



Рис. 1. Фрезерно-гравировальный универсальный станок HY-6040 CNC

На терминальном уровне в системе ЧПУ используется промышленный компьютер, обеспечивающий современный пользовательский интерфейс, совместимый с операционной системой Windows – MCP15E (рис. 2).

В практикуме предлагается выполнять следующие виды лабораторных работ:

- изучение возможностей, структуры и интерфейса программного обеспечения системы ЧПУ серии MNC800, элементов управления и средств визуализации;

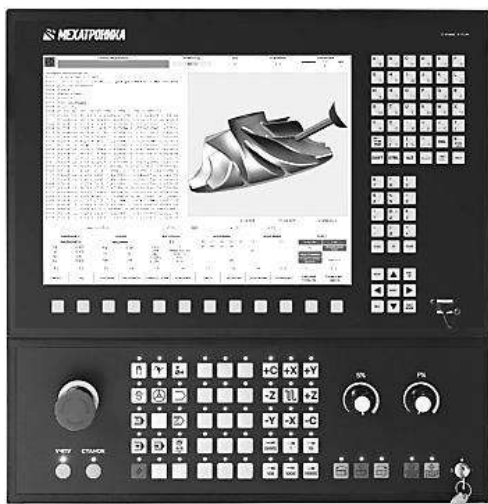


Рис. 2. Пользовательский терминал системы ЧПУ MCR15E

- разработка управляющих программ для контурной обработки деталей в декартовой или полярной системах координат;
- изучение работы с инструментом и применение коррекции на радиус или длину инструмента;
- изучение постоянных токарных, сверлильных и фрезеровальных циклов;
- изучение работы поворота стола станка в двух плоскостях.

Вывод: таким образом, обучающиеся смогут изучить принципы фрезерной обработки, освоить навыки разработки управляющих программ в системе ЧПУ, а также научиться описывать геометрические элементы G-кодом.

Литература

1. Цифровой станочный электропривод [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.chinacnczone.com/ru/chinacnczone-hy-6040-smalldesktop-diy-машина-5-ось-сnc-для-фрезерно-грави_1324_p171.html.
2. Управляющий программно-аппаратный комплекс MNC [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://mtronics.ru/produktsiya/sistemy-chpu/?ysclid=m9cnxt6thc695170980>.
3. Цифровой станочный электропривод [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://mtronics.ru/produktsiya/tsifrovoy-elektroprivod/?ysclid=m9cnocs68b940049859>.

УДК 621.314

М.А. СОЛОМАНИЧЕВ, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: sma24sma@yandex.ru

Система автоматизированного взаимосвязанного электропривода переменного тока перематывающего агрегата с микроконтроллерным устройством стабилизации плотности намотки текстильных материалов

Аннотация. В данной статье рассмотрен принцип построения системы управления взаимосвязанного частотно-регулируемого асинхронного электропривода перематывающего агрегата, оснащенного устройством стабилизации плотности намотки ткани в рулон, реализованным на базе быстродействующего микроконтроллера. Показана целесообразность применения в указанной системе электропривода данного устройства, использующего в процессе намотки математическую модель закона управления на основе спирали Архимеда.

Ключевые слова: взаимосвязанный электропривод, осевой накат, устройство стабилизации плотности намотки, ткань, микроконтроллер, математическая модель, спираль Архимеда, датчик натяжения, асинхронный электродвигатель, преобразователь частоты

М.А. SOLOMANICHEV, Senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34
E-mail: sma24sma@yandex.ru

System of automated interconnected ac electric drive of rewinding unit with microcontroller device for stabilization of textile materials winding density

Abstract. In this article the principle of construction of the control system of the interconnected frequency-controlled asynchronous electric drive of the rewinding unit equipped with the device of stabilization of the fabric winding density, realized on the basis of the fast-acting microcontroller, is considered. The expediency of using this device in the specified electric drive system using in the process of winding a mathematical model of the control law based on Archimedes' spiral is shown.

Key words: interconnected electric drive, axial rolling, winding density stabilization device, fabric, microcontroller, mathematical model, Archimedes' spiral, tension sensor, asynchronous electric motor, frequency converter

В настоящее время широкое применение автоматизированного электропривода переменного тока в текстильном производстве для управления различным технологическим оборудованием (например, осевыми накатами) делает возможным обеспечение высокой точности регулиро-

вания важных параметров технологического процесса. В связи с этим, для перематывающих агрегатов целесообразно использовать вариант построения системы взаимосвязанного электропривода переменного тока с микроконтроллерным устройством стабилизации плотности намотки ткани в рулон, приведенный на рис. 1.

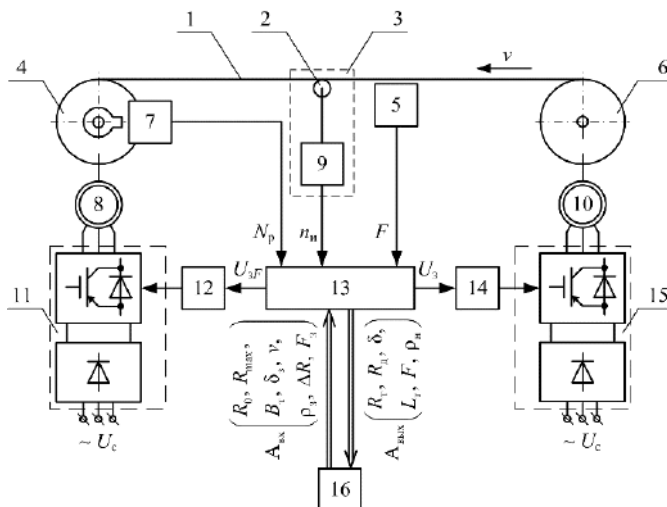


Рис. 1. Функциональная схема системы взаимосвязанного электропривода перематывающего агрегата с микроконтроллерным устройством стабилизации плотности намотки:

1 – ткань; 2 – измерительный ролик; 3 – датчик длины полотна ткани, движущегося со скоростью v ; 4 – формируемый рулон; 5 – датчик натяжения ткани F ; 6 – рулон, подающий ткань; 7 – датчик числа оборотов рулона N_p ; 8, 10 – соответственно электродвигатели механизмов вращения рулонов 4 и 6; 9 – элемент датчика 3, формирующий последовательность из n_n импульсов; 11, 15 – соответственно преобразователи частоты, питающие электродвигатели 8 и 10; 12, 14 – соответственно блоки управления транзисторными ключами преобразователей 11 и 15; 13 – микроконтроллер, задающий сигналы по напряжению U_s и U_{sf} ; 16 – панель управления; $A_{вх}$, $A_{вых}$ – соответственно массивы основных входных и выходных параметров процесса намотки; U_c – напряжение питающей сети

Указанное устройство выполнено на базе быстродействующего логического микроконтроллера DVP-SA2, поддерживающего обмен данными с панелью управления оператора DOP-B с помощью шинного интерфейса RS-485 [1]. Данная панель управления в этом случае выполняет функции ввода/вывода на дисплей постоянных и переменных параметров намотки, а также расчета всех параметров соответствующей математической модели, основываясь на данных, поступающих с микроконтроллера.

При построении математической модели процесса намотки здесь используется закон управления по спирали Архимеда и принцип минимизации разности между фактическим R_d и расчетным R_t радиусами формируемого рулона [2]. Для реализации указанной модели оператор с помощью панели управления заносит в память микроконтроллера основные входные постоянные и переменные параметры совершаемого процесса намотки ткани (массив $A_{вх}$ на рис. 1) – R_0 , R_{max} (радиус основания формируемого рулона и максимальный радиус намотки), B_t (ширину ткани), δ_3 , F_3 , ρ_3 (заданные значения параметра спирали Архимеда, натяжения ткани и плотности намотки), v (скорость намотки), ΔR (отклонение радиуса намотки от его расчетного значения R_t).

Необходимые данные о текущем состоянии процесса намотки, регистрируемые датчиковой системой, обрабатываются в микроконтроллере и далее поступают в панель управления, в которой в режиме реального времени рассчитываются и затем отображаются на дисплее основные переменные параметры намотки (массив $A_{вых}$ на рис. 1) – R_t , R_d (значения расчетного и фактического радиусов рулона), δ (значение параметра спирали Архимеда), L_t (длина полотна ткани в рулоне), F (натяжение ткани), ρ_n (величина расчетной плотности намотки).

В рассматриваемом варианте системы управления (рис. 1) при перематке полотна ткани 1 за полный оборот измерительного ролика 2 датчика 3 на выходе его импульсного элемента 9 формируется последовательность из n_i импульсов, соответствующая участку наматываемой в рулон 4 ткани определенной длины. При этом сигнал управления на изменение измеряемого датчиком 5 натяжения F полотна ткани, поступающей с рулона 6, определяется с помощью панели управления 16 в функции разности ΔR сигналов фактического R_d и теоретического R_t радиусов формируемого рулона, поступающих с микроконтроллера 13, причем

$$R_t = \delta_3 N_p, \quad (1)$$

где N_p – число оборотов рулона 4 на выходе датчика 7.

Датчик натяжения 5, выполненный в виде петлеобразователя с упругим элементом [3], обеспечивает согласование рабочих скоростей подающего ткань рулона 6 и наматываемого рулона 4, а также исключает недопустимые изменения натяжения F ткани. Рациональный подход к выбору параметров данного датчика [3] позволяет минимизировать чувствительность системы к вариациям параметров ткани, таких как модуль упругости, коэффициент вязкости и др. При этом сигнал, поступающий с датчика натяжения, позволяет выполнить количественную оценку мгновенной величины натяжения ткани и далее использовать эту информацию для его регулирования и идентификации других параметров процесса намотки, которые измеряются косвенно (например, внутренней плотности рулона).

Вращательное движение механизмам формируемого рулона 4 и рулона 6, подающего ткань, здесь передается соответственно от асинхронных

электродвигателей 8 и 10, имеющих короткозамкнутый ротор. Указанные электродвигатели получают питание от соответствующих преобразователей частоты 11 и 15 с векторным управлением и ориентацией переменных по вектору потокоцепления ротора.

При перематке ткани на входы блоков управления транзисторными ключами соответствующих преобразователей 11 и 15 (блоки 12 и 14) с помощью микроконтроллера 13 подаются соответственно сигналы заданий по напряжению $U_{3F} = U_3 - U_F$ и U_3 . Здесь U_3 , U_F – соответственно значения задающего напряжения, пропорционального постоянной величине скорости намотки v , и напряжения обратной связи по натяжению F ткани, вычисляемого с помощью панели управления 16 на основе сигнала с датчика натяжения 5 и далее записываемого в память микроконтроллера. Величина напряжения U_3 также предварительно записывается оператором в память микроконтроллера с помощью панели управления.

Таким образом, на основе сигналов с импульсного элемента 9 и с датчиков натяжения 5 и числа оборотов рулона 7, поступающих в микроконтроллер 13, с помощью панели управления по величине сигнала разности ΔR между фактическим R_d и расчетным R_t , вычисляемым по (1), радиусами рулона 4 выполняются коррекция и запись в память микроконтроллера величины сигнала задания по натяжению ткани F_3 . При этом в рассматриваемой системе взаимосвязанного электропривода перематывающего агрегата (рис. 1) обеспечивается процесс намотки полотна ткани в рулон с заданной плотностью ρ_3 .

Вывод. Применительно к системе управления перематывающего агрегата предложен вариант рационального построения системы автоматизированного электропривода на базе взаимосвязанного асинхронного частотно-регулируемого электропривода с микроконтроллерным устройством стабилизации плотности намотки, где в качестве управляющей координаты используется натяжение материала (ткани). При этом функция регулирования натяжения и плотности намотки обеспечивается под контролем тока электродвигателя в функции разности фактического и расчетного радиусов намотки.

Литература

1. Глазунов В.Ф., Пруднов А.В., Соломаничев М.А., Шишков К.С. Построение электропривода осевых накатов текстильного производства // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научн.-техн. конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2014). В 2 т. Т. 2 / отв. за вып. И.В. Гуляев. Саранск: Изд-во НИ Мордов. гос. ун-та имени Н.П. Огарева, 2014. С. 264-267.
2. Устройство для намотки ткани: пат. 46483 Российская Федерация, МПК 7 В 65 Н 23/00 / В.Ф. Глазунов, М.А. Соломаничев (Россия). – № 2005106063; заявл. 03.03.2005; опубл. 10.07.2005, Бюл. № 19, Приоритет 03.03.2005 (Россия). 5 с.
3. Глазунов В.Ф., Тарарыкин С.В., Спичков Ю.П. О рациональном построении датчика натяжения ткани в поточных линиях текстильной промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1981. № 1. С. 78-82.

УДК 621.313.333.2, 621.314.261

М.А. ЗАХАРОВ¹, ст. преподаватель,
Д.А. ПОЛКОШНИКОВ, ст. преподаватель,
А.С. СТРАХОВ, к.т.н., доцент,
Е.М. НОВОСЕЛОВ, к.т.н., доцент,
А.А. СКОРОБОГАТОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: mazoid@gmail.com¹

О возможности выявления межвитковых замыканий обмотки статора асинхронного двигателя в составе частотно-регулируемого привода

Аннотация. Работа посвящена обнаружению диагностических признаков межвитковых замыканий обмотки статора на имитационных моделях асинхронного двигателя при пуске и в установившемся режиме, работающих от преобразователя частоты.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, имитационное моделирование, межвитковое замыкание, ток статора, момент.

M.A. ZAKHAROV¹, senior lecturer,
D.A. POLKOSHNIKOV, senior lecturer,
A.S. STRAKHOV, PhD,
E.M. NOVOSELOV, PhD,
A.A. SKOROBOGATOV, PhD

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: mazoid@gmail.com¹

On the possibility of detecting interturn short circuits in the stator winding of an asynchronous motor as part of a variable-frequency drive

Abstract. The work is devoted to the detection of diagnostic signs of interturn short circuits of the stator winding on simulation models of an asynchronous motor during start-up and in steady-state mode, operating from a frequency converter.

Key words: asynchronous motor, frequency converter, simulation modeling, interturn short circuit, stator current, torque.

Асинхронные двигатели (АД) составляют более 70% приводных двигателей на промышленных предприятиях. Межвитковое замыкание признано одной из самых сложных для обнаружения неисправностей. Обычная защита может не сработать или двигатель может продолжать работать, в то время как нагрев в закороченных витках вскоре приведет к критиче-

скому пробое изоляции. Если их не обнаружить, то развитие повреждения приводит к необратимому повреждению сердечника, и двигатель будет выведен из эксплуатации. Поэтому обнаружение межвитковых замыканий на ранней стадии является приоритетным.

Одним из способов обнаружения повреждений является анализ сигналов тока статора и внешнего магнитного поля двигателя в пусковом и установившемся режиме. Проведение натурных экспериментов затруднительно, так как связано с работой с аварийным двигателем и может потребовать замены двигателя после каждого опыта.

В [1, 2] было описано влияние межвитковых замыканий на спектр тока статора АД без преобразователя частоты (ПЧ), а именно возрастание амплитуды гармоники с частотой 150 Гц. В [2] было отмечено, что такое же влияние на спектр тока статора может оказать асимметрия напряжения, что затрудняет процесс диагностирования. В настоящее время количество АД в составе частотно-регулируемых электроприводов растет. На выходе исправного ПЧ асимметрия напряжения отсутствует. Кроме того, данное устройство позволяет зарегистрировать момент, который также может являться диагностическим сигналом при определении межвитковых замыканий. В связи с этим необходимо произвести исследование спектров АД с межвитковыми замыканиями, работающих от ПЧ.

Целью работы является обнаружение диагностических признаков межвитковых замыканий обмотки статора на имитационных моделях АД при пуске и в установившемся режиме, работающих от ПЧ.

Для проведения исследования в программном комплексе Ansys были разработаны имитационные модели АД типа АИР71А6 мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов и ВА160М4 мощностью 18,5 кВт с 2 парами полюсов (рис. 1). Для приближения условий пуска к работе ПЧ со скалярным законом регулирования в разомкнутом режиме двигателя плавно разгонялись от 0 до 50 Гц за 5 секунд. Соотношение напряжения и частоты было выставлено $U/f = \text{const}$. Регистрировались 2 типа сигналов: тока статора и момента АД. Обработка зарегистрированных сигналов проводилась в программном комплексе Matlab на основе оконного преобразования Фурье.

На рис. 2 приведены частотно-временные спектры (ЧВС) сигналов тока статора и момента АД ВА160М4 в режиме пуска и в установившемся режиме. В сигнале тока на наличии короткозамкнутых витков указывает присутствие гармоники с частотой $f_{kzv1} = 3f_c$, где f_c – выходная частота ПЧ, Гц (рис. 2, а), в то время как для исправного АД данная гармоника в спектре отсутствует (рис. 2, б). В сигнале момента на наличии короткозамкнутых витков указывает присутствие гармоники с частотой $f_{kzvM} = 2f_c$ (рис. 2, в), в то время как для исправного АД данная гармоника в спектре отсутствует (рис. 2, г).

Результаты, полученные на АД типа АИР71А6, оказались аналогичными описанным ранее результатам.

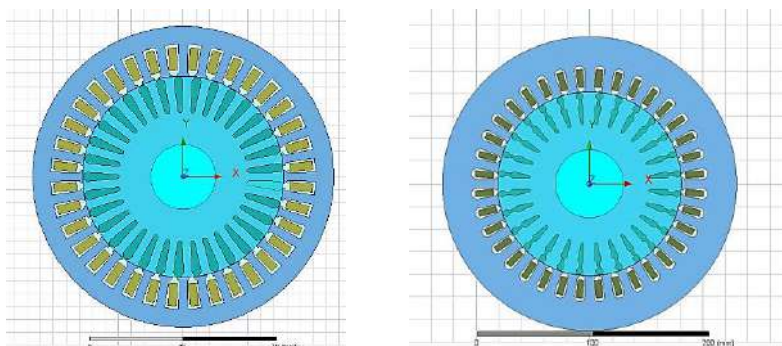


Рис. 1. Модели двигателей в Ansys: а) АИР71А6 б) ВА160М4

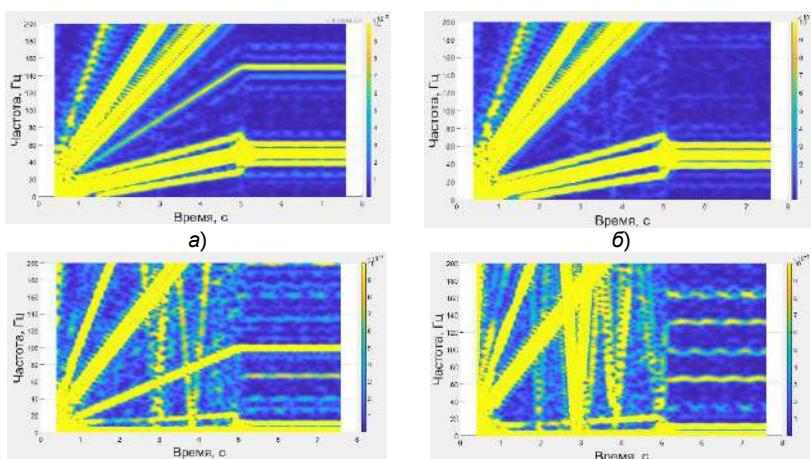


Рис. 2. Частотно временные спектры сигналов двигателя ВА160М4.
а – тока статора двигателя с одним короткозамкнутым витком; б – тока статора исправного двигателя; в – момента двигателя с одним короткозамкнутым витком; г – момента исправного двигателя

Выводы:

- межвитковое замыкание (даже наличие одного короткозамкнутого витка) вызывает заметное увеличение гармоник с частотой f_{kzv} в сигнале тока статора и гармоник с частотой f_{kzvM} в сигнале момента;
- данные гармоники ярко выражены не только в установившемся режиме работы, но и при пуске от ПЧ.

Литература

1. Мирохватов Д.А. Исследование влияния межвитковых замыканий на ток статора асинхронного электродвигателя / Д.А. Мирохватов, Е.А. Рождественская, А.А. Скоробогатов // Энергия-2024. Т. 3. Электроэнергетика / Девятнадцатая всероссийская (одиннадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2024»: материалы конференции: В 7 т. Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2024. Т.3. С.101–101

2. Gojko M. Joksimovic, Jim Penman The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors // IEEE transactions on industrial electronics, vol. 47. 2000. №5. С. 1078–1084.

УДК 62-837

Д.С. ЗАЙЦЕВ¹, аспирант

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

E-mail: fllans@mail.ru¹

Разработка системы управления СДПМ на основе полеориентированного метода с нейронной сетью для определения положения ротора

Аннотация. В данной работе представлена модель системы управления электроприводом, основанная на полеориентированном методе и использующая нейронные сети для определения положения ротора СДПМ. Предложенная бездатчиковая система управления, позволяет достичь высокой точности и надёжности. В текущем исследовании акцент делается на разработку и уточнение математической модели, что даёт возможность тестировать динамические характеристики двигателя и алгоритмы управления.

Ключевые слова: электропривод, полеориентированный метод, нейронные сети

D.S. ZAYTSEV¹, postgraduate

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

E-mail: fllans@mail.ru¹

Development of a PMSM control system based on field-oriented control with a neural network for rotor position estimation

Abstract. This paper presents a model of an electric drive control system based on field-oriented control and employing neural networks for rotor position estimation in a PMSM. The proposed sensorless control system enables the achievement of high accuracy and reliability. The current research focuses on the development and refinement of a mathematical model, which allows for testing the dynamic characteristics of the motor and control algorithms.

Key words: electric drive, field-oriented control, neural networks.

Современные технологии электроприводов играют ключевую роль в обеспечении производительности и эффективности различных промышленных систем, включая автомобили, автоматизированные производственные линии и робототехнические устройства использующие двигатели СДПМ [1]. Один из наиболее перспективных подходов к разработке систем управления электроприводами – это использование адаптивных методов, таких как NN (neural network или нейронная сеть), в комбинации с полеориентированным методом управления. В работе представлена модель системы управления электроприводом на основе полеориентированного метода с использованием NN для определения положения ротора двигателя СДПМ.

Полеориентированный метод (Field-Oriented Control, FOC) представляет собой один из наиболее эффективных способов управления СДПМ, который получил широкое распространение так как позволяет быстро, плавно и точно управлять положением вала, скоростью и моментом электродвигателя.

Алгоритм FOC требует получения обратной связи о положении ротора в реальном времени для обеспечения эффективного управления скоростью и выполнения необходимых математических преобразований опорных напряжений статора и токов обратной связи. В традиционной реализации такие алгоритмы опираются на физические датчики. Тем не менее, в связи с требованиями к высокой точности и экономической целесообразностью, решения по оценке положения без использования датчиков могут представлять более предпочтительные альтернативы физическим датчикам.

В данном исследовании предлагается бездатчиковая система управления, в которой используются нейронные сети (NN) для оценки положения ротора в реальном времени [1]. Архитектура предложенной системы управления СДПМ представлена на рис. 1.

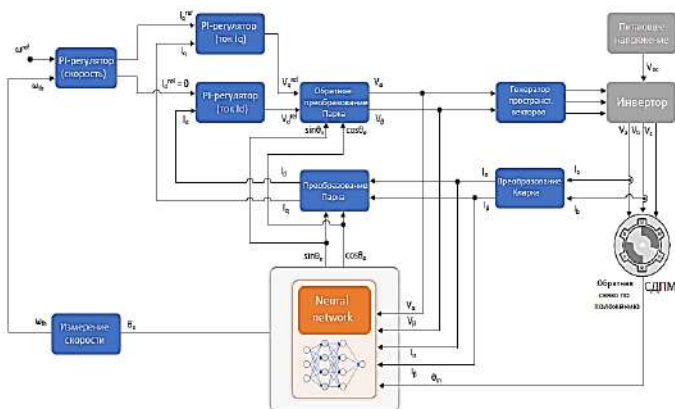


Рис. 1. Архитектура предлагаемой системы

Модель позволяет использовать либо обученную нейронную сеть, либо датчик (энкодер) для определения положения ротора.

Таким образом, требуется обучить нейронную сеть, используя данные V_α , V_β , I_α , I_β и θ_e , чтобы она могла точно преобразовывать входные данные в выходные и функционировать в качестве виртуального датчика положения, производя оценку положения ротора.

Алгоритм исследования разбит на несколько этапов:

1. Создание математической модели двигателя;
2. Симуляции и получения данных для обучения нейронной сети;
3. Выбор архитектуры и обучение нейронной сети;
4. Симуляция и проверка работы обученной нейронной сети;
5. Проверка работы системы управления в реальных условиях.

На данном этапе исследования акцент сделан на разработке и уточнении математической модели в среде MATLAB/Simulink. Это позволяет не только воспроизвести динамические характеристики двигателя, но и протестировать различные режимы работы системы управления. Дальнейшие шаги, такие как выбор архитектуры нейронной сети и ее обучение на собранных данных, планируются в ближайшем будущем.

После завершения этих этапов будут проведены симуляции, которые позволят проверить эффективность предложенной бездатчиковой системы управления. Ожидается, что использование нейронных сетей для оценки положения ротора обеспечит более высокую точность и надежность управления по сравнению с традиционными методами.

Таким образом, текущая работа направлена на создание высокоэффективной и экономически целесообразной системы управления электроприводом СДПМ, что может привести к улучшению производительности и внедрению новых стандартов в управление электродвигателями. Результаты дальнейших экспериментов и симуляций будут представлены в следующих публикациях, что позволит более подробно оценить вклад предложенной модели в развитие технологий управления электроприводами.

В заключение, подведём итог к значимости данного исследования в контексте современных требований к системам управления. Исследование бездатчиковых решений с использованием нейронных сетей открывает новые горизонты для повышения эффективности и адаптивности электроприводов, что может значительно повлиять на их применение в различных отраслях.

Литература

1. Yousef A. Review on Field Oriented Control of Induction Motor / Yousef, Ayman & Abdel maksoud, Samir // International Journal for Research in Emerging Science and Technology (IJREST), 2015, 2.
2. Зайцев Д. С. Исследование возможности применения искусственной нейронной сети в системах управления бездатчикового вентильно- индукторного двигателя / Д.С. Зайцев // Электромеханотроника и управление: Пятнадцатая Всероссий-

ская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2020": Материалы конференции. В 6 т. Т.4. Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. С. 13. EDN VKHJUQ.

УДК 62-83:621.313.84

В.А. СОЛОВЬЕВ, д.т.н., профессор,
В.В. СОЛОВЬЕВА, к.т.н., доцент,
В.А. СОБОЛЕВ, к.т.н., доцент

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
E-mail: solovjevva@bk.ru; soloveyev@mail.ru; vasobolev48@yandex.ru

Система коррекции амплитуды выходного напряжения элемента Холла датчика положения ротора вентильного двигателя

Аннотация. В работе рассмотрена автоматическая система, обеспечивающая стабильность амплитуды выходного напряжения элемента Холла датчика положения ротора вентильного двигателя. Представлены структурная схема системы, изложен принцип ее действия. Приведены временные диаграммы напряжений, иллюстрирующие процесс коррекции системой амплитуды выходного напряжения элемента Холла при ее пуске и ступенчатых изменениях напряжения управления.

Ключевые слова: датчик положения ротора, вентильный двигатель, элемент Холла, температурная нестабильность, разброс параметров, измеритель амплитуды напряжения, корректирующий регулятор.

V.A. SOLOVEV, Doctor of Engineering, Professor,
V.V. SOLOVEVA, PhD, Assistant professor,
V.A. SOBOLEV, PhD, Assistant professor

Bauman Moscow State Technical University
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya st., 5, building 1
E-mail: solovjevva@bk.ru; soloveyev@mail.ru; vasobolev48@yandex.ru

Correction system for the amplitude of the output voltage of the Hall element of the rotor position sensor of brushless DC motor

Abstract. The paper considers an automatic system that ensures stability of the amplitude of the output voltage of the Hall element of the rotor position sensor of a brushless DC motor. The structural diagram of the system is presented, and the principle of its operation is described. The time diagrams of voltages are given, illustrating the process of correction of the amplitude of the output voltage of the Hall element by the system during its start-up and step changes in the control voltage.

Key words: rotor position sensor, brushless DC motor, Hall element, temperature instability, parameter spread, voltage amplitude meter, correction regulator.

В датчиках положения ротора (ДПР) вентильных двигателей (ВД) со времени их изобретения широко применяются дискретные элементы Холла. Во второй половине 20-го века зарегистрировано множество авторских свидетельств и иностранных патентов на изобретения ВД, в которых для управления их полупроводниковым коммутатором используются ДПР с дискретными элементами Холла. Это объясняется тем, что такие ДПР, обладая дешевой и простой конструкцией, позволяют регулировать электромагнитный момент ВД и осуществлять его реверс изменением напряжения и его полярности на токовых выводах элементов, а при условии идентичности их параметров создать в двигателе равномерный в пределах оборота ротора электромагнитный момент [1, 2].

Элементы Холла практически безынерционны, поэтому их применение в ДПР не имеет ограничений, определяемых числом пар полюсов и номинальной частотой вращения ВД. Выходные напряжения элементов Холла малы, но они могут быть усилены операционными усилителями.

Основными недостатками элементов Холла являются большой разброс и значительная зависимость их параметров от температуры [3]. Это затрудняет серийное производство и взаимозаменяемость ДПР с этими чувствительными элементами.

Практически не подвержены влиянию температуры и разбросу параметров элементов Холла содержащие их магниточувствительные микросхемы, в которых их выходные напряжения преобразуется пороговыми устройствами в напряжение, соответствующее логической 1 или 0. ДПР с такими чувствительными элементами применяют для задания в ВД квазипрямоугольных фазных токов [4].

При повышенных требованиях к равномерности электромагнитного момента в современных ВД для задания синусоидальных фазных токов используются ДПР на основе резольвера, т.е. бесконтактного синусно-косинусного вращающегося трансформатора. Выделение огибающих его выходных напряжений осуществляется специальными микросхемами, которые, как и резольверы, не выпускаются отечественной промышленностью [5].

Целью работы являлась разработка автоматической системы, обеспечивающей при изменении температуры и разбросе параметров элемента Холла ДПР стабильность амплитуды его выходного напряжения, заданной напряжением управления электромагнитного момента ВД.

Амплитуда выходного напряжения элемента Холла при синусоидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре ДПР составляет

$$U_{x\max} = k_x U_y B_{\max}, \quad (1)$$

где $B_{\max}$ – амплитуда магнитной индукции, воздействующей на элемент Холла; U_y – напряжение управления на токовых выводах элемента Холла; k_x – чувствительность элемента Холла.

Из выражения (1) следует, что выходное напряжение элемента Холла создается воздействием двух физических величин. Поэтому и его чувствительность зависит от значения чувствительностей по каждой из них. При производстве однотипных элементов Холла стараются выдерживать средние значения их чувствительности $k_{x,ср}$, а также ее составляющих, т.е. чувствительности по напряжению $k_{U,ср}$ и чувствительности по магнитной индукции $k_{B,ср}$. Тогда выражение (1) можно представить в следующем виде

$$U_{x\max} = k_U^* k_{U.c.} k_B^* k_{B.c.} U_y B_{\max} = k_x^* k_{x.cр} U_y B_{\max}, \quad (2)$$

где $k_U^* = k_U/k_{U,ср}$ – относительное значение чувствительности элемента Холла по напряжению; $k_B^* = k_B/k_{B,ср}$ – относительное значение чувствительности элемента Холла по магнитной индукции; $k_x^* = k_x/k_{x,ср}$ – относительное значение чувствительности элемента Холла.

Структурная схема системы, осуществляющей коррекцию амплитуды выходного напряжения элемента Холла при изменении температуры и отклонении составляющих его чувствительности от средних значений, приведена на рис. 1.

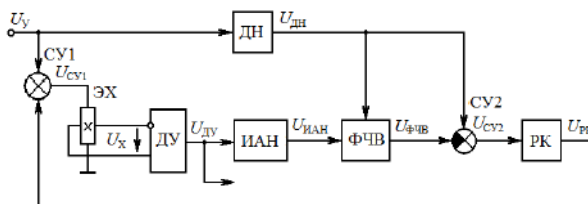


Рис. 1. Структурная схема системы стабилизации амплитуды выходного напряжения элемента Холла ДПР

Она состоит из дифференциального усилителя ДУ, усиливающего выходное напряжение элемента Холла ЭХ U_x , измерителя амплитуды напряжения ИАН, фазочувствительного выпрямителя ФЧВ, суммирующего СУ1 и сравнивающего СУ2 устройств и корректирующего регулятора РК.

Объект управления в этой системе представляет ЭХ с ДУ. Регулируемой переменной является амплитуда выходного напряжения ДУ $U_{ДУ}$, значение которого задается выходным напряжением делителя напряжения ДН $U_{ДН}$. Оно пропорционально напряжению управления U_y и равно амплитуде выходного напряжения ЭХ при среднем значении его чувствительности $k_{x,ср}$. Измеренное ИАН напряжение амплитуды выходного напряжения ДУ $U_{ДУ}$ после приведения ФЧВ его полярности в соответствие с полярностью напряжения ДН $U_{ДН}$ и уже как напряжение $U_{ФЧВ}$ сравнивается с ним в СУ2. Напряжение их рассогласования $U_{СУ2}$ поступает на вход РК, выходное напряжение $U_{РК}$ которого подается на второй вход СУ1 и корректирует заданное напряжением U_y напряжение

на токовых выводах ЭХ $U_{\text{сy1}}$. В РК реализован интегральный закон регулирования, поэтому независимо от причины рассогласования напряжений $U_{\text{дн}}$ и $U_{\text{фчв}}$ оно сводится к нулю.

Проверка эффективности действия системы коррекции амплитуды выходного напряжения ЭХ ДПР проводилась на созданной в среде NI Multisim ее схемотехнической модели. В ней ЭХ, принимая во внимание соотношение (2), представлен умножителем с коэффициентами усиления по входам k^*_u и k^*_v , а магнитная цепь ДПР источником переменного синусоидального напряжения.

Испытания модели системы проводились в установившихся и в переходных режимах при ступенчатых изменениях напряжения управления U_y . При их исследовании частота источника переменного напряжения с $U_{\text{max}} = 1\text{В}$, имитирующего изменение магнитной индукции в воздушном зазоре ДПР, изменялась в пределах $f = 2,5 \text{ Гц} \dots 200 \text{ Гц}$, напряжение управления амплитудой выходного напряжения элемента Холла обеих полярностей в диапазоне $|U_y| = (0,05 \dots 1,0)|U_{y\text{max}}|$, а относительные чувствительности задавались в пределах $k^*_u = 0,7 \dots 1,2$, $k^*_v = 0,7 \dots 1,2$ и $k^*_x = 0,6 \dots 1,4$ при различных сочетаниях значений k^*_u и k^*_v .

На рис. 2а, б представлены временные диаграммы напряжений $U_{\text{дн}}$ и $U_{\text{фчв}}$ при ступенчатых изменениях напряжения управления U_y положительной и отрицательной полярности. Они получены при $f = 50 \text{ Гц}$, $k^*_u = 0,8$, $k^*_v = 0,9$ и $k^*_x = k^*_u k^*_v = 0,72$.

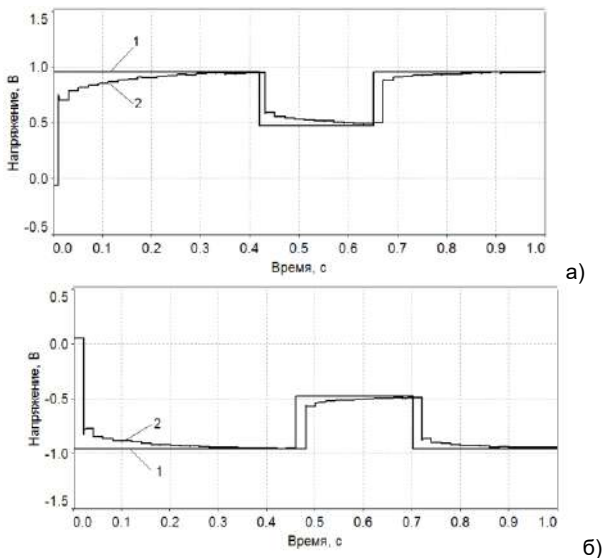


Рис. 2. Временные диаграммы выходных напряжений ДН и ФЧВ при ступенчатых изменениях напряжения управления U_y положительной а) и отрицательной б) полярности: 1 – напряжение $U_{\text{дн}}$, 2 – напряжение $U_{\text{фчв}}$

Из временных диаграмм на рис. 2а, б следует, что в момент пуска системы и в моменты ступенчатых изменений напряжений управления U_y между выходными напряжениями ДН и ФЧВ устанавливается соотношение $|U_{ФЧВ}| = k^*_{\chi} |U_{ДН}|$. После окончания переходного процесса устанавливается равенство $|U_{ФЧВ}| = |U_{ДН}|$, т.е. независимо от значения чувствительности элемента Холла и температуры амплитуда его выходного напряжения становится равной амплитуде элемента Холла со средним значением чувствительности при рабочей температуре его эксплуатации.

По результатам испытания схемотехнической модели рассмотренной автоматической системы можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная автоматическая система позволяет нейтрализовать влияние температуры и разброса чувствительности на амплитуду выходного элемента Холла, расположенного в воздушном зазоре датчика ротора вентильного двигателя

2. При изготовлении функциональных узлов этой системы могут быть использованы отечественные микросхемы и операционные усилители.

3. Применение созданной системы в датчиках положения ротора вентильных двигателей позволяет без снижения их функциональных возможностей заменить в них резольвер на дискретные элементы Холла.

Литература

1. Kröger G. Kollektorlose Gleichstrommotoren // Archiv für technischen Messen (ATM). April 1968. S. 79-82.
2. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979. 270 с.
3. Баранчиков М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т.1. М.: ДМК Пресс, 2001. 544 с.
4. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями: Монография / Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 240 с.
5. Практика приводной техники. Сервоприводы // SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Bruchsal, Germany, издание 09/2006. 142 с. Режим доступа: <http://www.deltronix.su/doc/11322853.pdf> (дата обращения 19.11.2024).

УДК 62-83:621.313.84

В.А. СОЛОВЬЕВ, д.т.н., профессор,
В.В. СОЛОВЬЕВА, к.т.н., доцент,
В.А. СОБОЛЕВ, к.т.н., доцент

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
E-mail: solovjevva@bk.ru; soloveyev@mail.ru; vasobolev48@yandex.ru

Оптимизация относительной длительности прямоугольных фазных токов в вентильных двигателях

Аннотация. В работе изложены результаты оптимизации относительной длительности прямоугольных фазных токов вентильного двигателя по критерию

равенства мощности потерь в меди его фазных обмоток при синусоидальном и прямоугольном фазных токах. Показано влияние относительной длительности прямоугольных фазных токов фазных обмоток вентильного двигателя на развиваемую им электромагнитную мощность.

Ключевые слова: вентильный двигатель, мощность потерь в меди обмоток, синусоидальный и прямоугольный фазный ток, оптимальный угол включения секции фазной обмотки

V.A. SOLOVEV, Doctor of Engineering, Professor,
V.V. SOLOVEVA, PhD, Assistant professor,
V.A. SOBOLEV, PhD, Assistant professor

Bauman Moscow State Technical University
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya st., 5, building 1
E-mail: solovjevva@bk.ru; soloveyev@mail.ru; vasobolev48@yandex.ru

Optimization of the relative duration of rectangular phase currents in brushless DC motors

Abstract. The paper presents the results of optimization of the relative duration of rectangular phase currents of a brushless DC motor based on the criterion of equality of power losses in copper of its phase windings with sinusoidal and rectangular phase currents. The influence of the relative duration of rectangular phase currents of the phase windings of a brushless DC motor on the electromagnetic power developed by it is shown.

Key words: brushless DC motor, power loss in copper windings, sinusoidal and rectangular phase current, optimal angle of inclusion of phase winding section.

Характеристики вентильных двигателей (ВД) существенно зависят от форм их фазных ЭДС и токов. Известно, что при постоянстве потерь мощности в меди максимальная мощность ВД достигается при совпадении форм фазного тока и фазной ЭДС вращения. При этом обеспечивается максимальный КПД и коэффициент использования электрической машины ВД [1]. Поэтому в ВД с синусоидальной ЭДС стараются формировать фазные токи синусоидальной формы.

Однако синусоида является не единственной формой фазных токов, получившей распространение в ВД с синусоидальной ЭДС вращения. В зависимости от области применения, допустимых пульсаций электромагнитного момента и других технических требований в фазных обмотках ВД с синусоидальной ЭДС вращения могут формироваться токи прямоугольной формы [2].

Прямоугольные фазные токи обычно формируются в ВД с дискретными датчиками положения ротора (ДПР), которые по сравнению с ВД, содержащими аналоговые ДПР, меньше подвержены воздействию электромагнитных помех и поэтому обладают большей надёжностью функционирования при удалении блока управления и коммутатора от электро-механической части ВД.

Несовпадение форм фазных ЭДС вращения и токов снижает эффективность электромеханического преобразования энергии в ВД, которое будет проявляться в снижении развиваемой электродвигателем электромагнитной мощности. Её значение зависит от относительной длительности прямоугольных фазных токов. Определим математическое выражение этой зависимости при идеальных условиях их коммутации и оценим степень уменьшения электромагнитной мощности ВД по сравнению с её значением при синусоидальных фазных токах.

С учётом подобия проходящих в фазных обмотках ВД процессов это можно выполнить только для одной секции фазной обмотки. Поставленную задачу будем решать при условии равенства мощностей потерь в меди при синусоидальных и прямоугольных фазных токах. Для их расчёта воспользуемся выражением

$$\Delta P_{м.с} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{с1}}^{\alpha_{с2}} R_c \cdot i_c^2(\alpha) d\alpha, \quad (1)$$

а развиваемую ВД электромагнитную мощность при работе одной секции фазной обмотки будем определять по формуле

$$P_{эм.с} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{с1}}^{\alpha_{с2}} e_c(\alpha) \cdot i_c(\alpha) d\alpha, \quad (2)$$

где α – угол поворота ротора ВД (в электрических радианах), отсчитываемый от момента естественной коммутации секции фазной обмотки; R_c – активное сопротивление секции фазной обмотки ВД; $i_c(\alpha)$ – зависимость тока включенной секции фазной обмотки от угла поворота ротора; $e_c(\alpha)$ – зависимость ЭДС вращения включенной секции фазной обмотки от угла поворота ротора.

Подставляя в (2) $e_c(\alpha) = U_n v \sin \alpha$, при синусоидальном фазном токе $i_c(\alpha) = I_{с.мах} \sin \alpha$ получим

$$\Delta P_{м.с.син} = \frac{1}{2} R_c I_{с.мах}^2, \quad (3)$$

$$P_{эм.с.син} = \frac{1}{2} U_n v I_{с.мах}, \quad (4)$$

а при прямоугольном фазном токе

$$\Delta P_{м.с.пр} = \frac{1}{\pi} R_c I_{с.пр}^2 \alpha_{вкл}, \quad (5)$$

$$P_{эм.с.пр} = \frac{2}{\pi} U_n v I_{с.пр} \sin \frac{\alpha_{вкл}}{2}, \quad (6)$$

где U_n – напряжение источника питания ВД; v – относительная частота вращения ВД; $I_{с.мах}$ – амплитуда синусоидального тока секции фазной обмотки; $I_{с.пр}$ – амплитуда прямоугольного тока секции фазной обмотки;

$\alpha_{\text{вкл}} = \alpha_{2с} - \alpha_{1с}$ – угол поворота ротора ВД, соответствующий длительно-сти прямоугольного тока в секции фазной обмотки; $\alpha_{1с}\alpha_{2с}$ – углы поворота ротора ВД, при которых происходит подключение и отключение секции фазной обмотки, отсчитываемые от момента перехода её ЭДС вращения через нуль.

Приравнявая (3) и (5), получим соотношение между амплитудами синусоидального и прямоугольных фазных токов с заданным углом включения

$$I_{с.пр} = I_{сmax} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha_{\text{вкл}}}}. \quad (7)$$

Выражение (6) после подстановки в него (7) принимает вид

$$P_{\text{эм.с.пр}} = \frac{2}{\pi} U_{\text{п}} v I_{сmax} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha_{\text{вкл}}}} \sin \frac{\alpha_{\text{вкл}}}{2}. \quad (8)$$

На рис.1 представлено графическое изображение зависимостей (7), (8), построенных в относительных единицах

$$I_{с.пр}^* = \frac{I_{с.пр}}{I_{сmax}}, \quad P_{\text{эм.с.пр}}^* = \frac{P_{\text{эм.с.пр}}}{P_{\text{эм.с.син}}}.$$

Анализ приведенных на рис. 1 кривых показывает, что при фиксированном действующем значении прямоугольных фазных токов развиваемая ВД электромагнитная мощность имеет максимум. Исследуя на экстремум выражение (8), получим трансцендентное уравнение

$$\text{tg} \frac{\alpha_{\text{вкл}}}{2} = \alpha_{\text{вкл}}.$$

Решением этого уравнения численными методами будет оптимальный угол включения секций фазных обмоток $\alpha_{\text{вкл.опт}} = 133^0$, при котором развиваемая ВД с прямоугольными фазными токами электромагнитная мощность будет максимальна и составляет 96% электромагнитной мощности ВД с синусоидальными токами, а амплитуда прямоугольного тока будет равна $I_{с.пр} = 0,821 I_{сmax}$.

Указанное значение угла $\alpha_{\text{вкл.опт}}$ является оптимальным только по критерию максимальной электромагнитной мощности ВД при равенстве мощностей потерь в меди в фазных обмотках ВД и не учитывает выполнение других требований, таких как простота технических решений, реализующих в ЭМ прямоугольные фазные токи с необходимым $\alpha_{\text{вкл}}$. Они зависят от числа фаз и схемы соединения фазных обмоток ВД.

В двухфазных ВД с дискретными ДПР просто реализуются прямоугольные фазные токи с $\alpha_{\text{вкл}} = 180^0$, а при установке в ДПР второго комплекта чувствительных элементов с $\alpha_{\text{вкл}} = 90^0$. При этих углах включения электромагнитная мощность этого ВД будет равна 0,934 ее значению при $\alpha_{\text{вкл.опт}}$. В трехфазных ВД сложно сформировать фазные токи с $\alpha_{\text{вкл}}$

$= 180^\circ$ и с $\alpha_{\text{вкл}} = 120^\circ$. При $\alpha_{\text{вкл}} = 120^\circ$ электромагнитная мощность трехфазного ВД составит 0,994 от ее значению при $\alpha_{\text{вкл.опт.}}$.

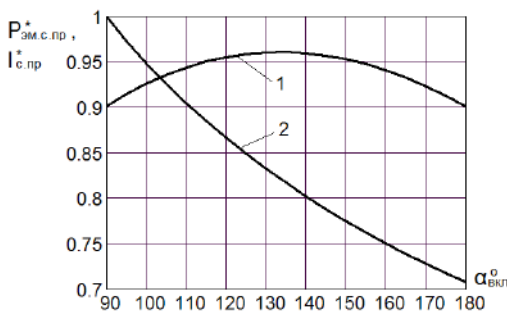


Рис. 1. Зависимости $I_{\text{с.пр}}^*$, $P_{\text{эм.с.пр}}^*$ от $\alpha_{\text{вкл}}$ при $\Delta P_{\text{м.с.пр}} = \Delta P_{\text{м.с.син}}$:
1 - $P_{\text{эм.с.пр}}^*(\alpha_{\text{вкл}})$; 2 - $I_{\text{с.пр}}^*(\alpha_{\text{вкл}})$

Полученные соотношения позволяют на этапе проектирования ВД с прямоугольными фазными токами оценить степень уменьшения его электромагнитной мощности по сравнению с её значением при синусоидальных фазных токах при условии равенства мощности потерь в меди фазных обмоток.

Литература

1. Микроэлектронные электросистемы. Применения в радиоэлектронике/ Ю.И. Конев, Г.Н. Гулякович, К.П. Полянин и др. // под ред. Ю.И. Конева. М.: Радио и связь, 1987. 240 с.
2. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями: монография / Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 240 с.
3. Анучин С.А. Системы управления электроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.

СЕКЦИЯ 8.

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

УДК 62-503.5

В.Н. ЕГОРОВ, к.т.н., доцент,

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

Система для управления количеством материала в секции поточной линии

Аннотация. Предложен вариант системы с адаптивным управлением количеством материала в секции поточной линии, реализуемый средствами микропроцессорной техники. Получен патент на изобретение.

Ключевые слова: поточная линия, материал, длина, адаптивное управление соотношением скоростей, микропроцессорная система.

V.N. EGOROV, Candidate of Engineering, docent,

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

A system for controlling the amount of material in a section of a production line

Annotation. A variant of the system with adaptive control of the amount of material in the section of the production line, implemented by means of microprocessor technology, is proposed. A patent for an invention has been obtained.

Key words: production line, material, length, adaptive speed ratio control, microprocessor system.

В настоящее время актуальными являются задачи импортозамещения и модернизации оборудования промышленных предприятий, а решение этих задач невозможно без современных средств автоматизации и управления. Во многих отраслях промышленности (текстильной, металлургической, бумагоделательной и др.) широкое применение нашли поточные линии с многодвигательными приводными системами и с управлением скоростью рабочих органов в разных точках линии. Такие технологические объекты специалисты по системам управления относят к классу объектов управления с параметрической неопределенностью. Для управления такими объектами могут быть применены

адаптивные (самонастраивающиеся) системы управления, обеспечивающие компенсацию параметрических, сигнальных, функциональных или структурных неопределенностей объекта управления за счет автоматической подстройки регулятора в ходе рабочего функционирования системы [1,2].

Была предложена система для управления соотношением скоростей на участке поточной линии непрерывного действия [3]. Дальнейшее развитие с целью улучшения качества управления эта система получила в устройстве, защищённом патентом [4].

На рис. 1 приведена блок-схема устройства для управления количеством материала в секции поточной линии.

Устройство (рис.1) предложено для секции технологической машины 2, например, с текстильным материалом 1, который подаётся входным рабочим органом 3 и выбирается выходным рабочим органом 4. На материал 1 должны быть нанесены метки 5, контролируемые входным 6 и выходным 7 импульсными датчиками количества текстильного материала в технологической машине 2.

Внутри секции материал 1 подвергается какой-либо обработке, а технологическими параметрами для материала являются, в большинстве случаев, время нахождения в секции, длина (количество) и натяжение материала и управлять (регулировать) этими параметрами можно по соотношению скоростей рабочих органов.

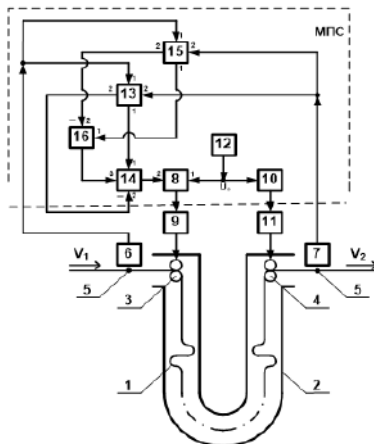


Рис.1

Устройство, состоящее из обозначенных ниже функциональных блоков и связанных между собой, как показано на рис. 1, работает следующим образом.

К входному рабочему органу 3 подключены соединённые последовательно блок управления 8 и привод 9, а к выходному рабочему орга-

ну 4 подключены соединенные 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. В соответствии с сигналом задания U_3 от задающего блока 12 блоки управления 8 и 10 устанавливают линейные скорости материала 1 на входе V_1 и выходе V_2 секции машины 2.

Справедливо соотношение для этих скоростей

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

где ε – относительное изменение длины (усадка/вытяжка) обрабатываемого материала 1.

Поскольку значение ε является случайной величиной, то из выражения (1) получаем условие *целесообразной настройки* соотношения линейных скоростей:

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

где m_ε – математическое ожидание относительного изменения длины (усадки/вытяжки) обрабатываемого материала 1.

Но поскольку имеет место неравенство $\varepsilon \neq m_\varepsilon$, реальное соотношение линейных скоростей по формуле (1) отличается от условия настройки соотношения линейных скоростей по формуле (2). Это, учитывая и различия в возможном проскальзывании материала 1 во входном рабочем органе 3 и в выходном рабочем органе 4, ведёт к значительному отклонению количества (длины) материала 1 в машине 2 за допустимые границы, что может вызвать останов технологического процесса и/или ухудшить качество обрабатываемого материала 1.

Поэтому, для управления количеством материала 1 в машине 2 применен трёхпозиционный релейный логический блок коррекции 13, который принимает импульсы, формируемые входным датчиком 6 и выходным датчиком 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 6 и выходного датчика 7 сигналы на выходах трёхпозиционного релейного логического блока коррекции 13 равны нулю и *линейная скорость* V_1 текстильного материала 1 на входе в секцию машины 2 *равна заданной* согласно формуле (2).

В случае же поступления двух (или более) импульсов подряд от входного датчика 6 в интервале времени между регистрацией смежных импульсов от выходного датчика 7 на первом выходе трёхпозиционного релейного логического блока коррекции 13 формируется сигнал обратной связи. Этот сигнал сообщает о необходимости *снижения* линейной скорости V_1 материала 1 на входе в машину 2. При поступлении двух (или более) импульсов подряд от выходного датчика 7 в интервале времени между регистрацией смежных импульсов от входного датчика 6 на втором выходе релейного логического блока коррекции 13 форми-

руется сигнал обратной связи, который сообщает о необходимости *повышения* линейной скорости V_1 текстильного материала 1 на входе в машину 2.

Сигналы, сформированные трёхпозиционным релейным логическим блоком коррекции 13, через сумматор 14 воздействуют на блок управления 8 и вызывают ступенчатое изменение линейной скорости V_1 материала 1 на входе в машину 2. Сигналы же, сформированные триггером 15 по данным от датчиков 6 и 7, интегрируются интегратором 16, что позволяет *плавно изменять линейную скорость* V_1 текстильного материала 1 на входе в технологическую машину 2 до тех пор, пока скважность импульсных сигналов на обоих выходах триггера 15 не станет равной 0,5.

Поскольку процесс коррекции начинается с первым импульсом входного датчика 6 или от выходного датчика 7, то обеспечивается высокое быстродействие устройства при компенсации возмущений.

Из-за однополярности сигналов на выходах трёхпозиционного релейного логического блока коррекции 13 и триггера 15 *необходимый знак сигнала обратной связи* на втором входе блока управления 8 достигается наличием *инвертирующих вторых входов* у интегратора 16 и у сумматора 14. В результате этого, низкочастотные автоколебания, возникающие в устройстве за счёт действия интегратора 16, становятся *симметричными*. И это обеспечивает компенсацию внешних и параметрических возмущающих воздействий, таких как: износ рабочих органов 3 и 4; изменение проскальзывания материала 1 в рабочих органах 3 и 4 при смене, например, параметров техпроцесса в машине 2; ошибка в установке сигнала задания U_3 и т.д.

Блок управления 8 в устройстве (рис.1) производит необходимую коррекцию линейной скорости V_1 материала 1 на входе в машину 2. Сигнал, сформированный блоком 13 для сумматора 14, сохраняется до тех пор, пока от смежного датчика меток не поступят два импульса подряд. Это должно быть в интервале времени между регистрацией смежных импульсов от датчика, чья пара импульсов вызвала коррекцию линейной скорости V_1 , что необходимо для восстановления заданного (исходного) количества материала 1 в машине 2.

Реализация предложенного устройства может быть выполнена средствами микропроцессорной техники (МПС), что позволит надежно и с высоким быстродействием осуществлять адаптивное к внешним возмущениям управление количеством материала в технологической машине в условиях изменения его параметров.

Литература

1. Бельцов В.М. Оборудование текстильных отделочных предприятий: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп./В.М. Бельцов; СПГУТД. СПб. 2000. 568 с.
2. Бобцов А.А., Никифоров В.О., Пыркин А.А., Адаптивное управление возмущенными системами. Уч. пособие. СПб.,: Университет ИТМО, 2015 .126с.
3. Егоров В.Н. Микропроцессорная система для адаптивного управления со-

отношением скоростей в технологической машине. В кн.: Сборник научных трудов VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий». Уфа, УГНТУ, 18-19 апреля 2023г.

4. Патент на изобретение РФ № 2578395. Егоров В.Н., Александрова Е.Е., Лыкова Н.В. В65Н23/02. Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина. Заявл. 30.05.2014, опубл. 27.03.16, Бюл. №9, 7 с., ил.

УДК681.5.015.24

К.Е. СОКОЛОВ, аспирант
А.А. АНИСИМОВ, д.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: 616kost@mail.ru

Экспериментальные исследования робастных мехатронных систем на базе лабораторного стенда

Аннотация. В работе рассматриваются возможности использования цифровых следящих систем для реализации робастного управления мехатронными объектами.

Ключевые слова: мехатронная система, регулятор состояния, наблюдатель состояния, синтез робастной системы, грамианный метод.

К.Е. SOKOLOV, graduate student
А.А. ANISIMOV, Doctor of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: 616kost@mail.ru

Experimental research of robust mechatronic systems based on a laboratory stand

Annotation. The work discusses the possibilities of using digital tracking systems to implement robust control of mechatronic objects.

Key words: mechatronic system, state controller, state observer, robust system synthesis, gramian method.

Задачей экспериментальных исследований является оценка эффективности разработанных систем автоматического управления (САУ) с регуляторами и наблюдателями состояний (РНС) в условиях, характерных для реальных мехатронных объектов. Однако исследуемые объекты в составе технологического оборудования зачастую являются достаточно дорогостоящими, что затрудняет проведение экспериментов. По этой причине подобные исследования целесообразно проводить на

базе экспериментальных стендов, позволяющих имитировать мехатронные системы (МС) [1].

К настоящему времени разработан ряд подходов к математическому и физическому моделированию подобных объектов, отличающихся степенью приближения модели к реальной МС [1]. В таких моделях, как правило, быстрая электрическая часть и элементы управления электроприводом выбираются реальными, а механические звенья заменяются их физическими эквивалентами.

Экспериментальный стенд, предназначенный для исследования САУ мехатронными объектами, содержит четыре идентичных канала управления двигателями постоянного тока. В основу стенда положен микропроцессорный контроллер движения Turbo PMAC [2]. Каждый из четырех каналов стенда содержит силовой преобразователь со встроенным регулятором тока и блоком ШИМ, двигатель постоянного тока и импульсный датчик положения (энкодер). Контуры управления током двигателей стенда выполнены в аналоговой форме и получают задающее воздействие от контроллера движения. При этом микропроцессорный контроллер движения реализует алгоритмы управления скоростью и положением электропривода.

На основе стенда была реализована физическая модель типичной двухмассовой МС, схема которой приведена на рис. 1 а, где СП – силовой преобразователь; ЭД – электродвигатель; РО – рабочий орган; u и U – управляющее и выходное напряжение СП; I – ток якорной цепи; M – электромагнитный момент; M_y – момент упругости; Ω_1 и Ω_2 – угловые скорости ЭД и РО. Вращающаяся масса РО имитируется 2-м двигателем стенда, соединенным с 1-м упругой передачей.

Структурная схема математической модели рассматриваемой МС приведена на рис. 1б, соответствующая передаточная функция по каналу управления:

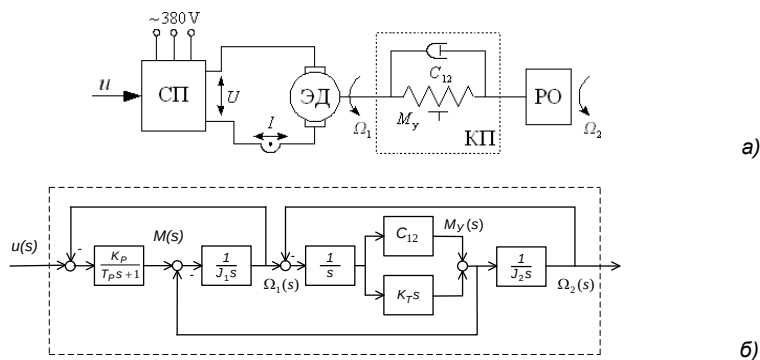


Рис. 1. Функциональная (а) и структурная (б) схемы двухмассовой МС

$$H_o(s) = \frac{K_p(K_T s + C_{12})}{J_1 J_2 s^3 + (K_T(J_1 + J_2) + K_p J_2)s^2 + (C_{12}(J_1 + J_2) + K_p K_T)s + K_p K_T},$$

где K_p – коэффициент передачи токового контура; J_1 и J_2 – моменты инерции двигателя и РО; C_{12} и K_T – коэффициенты жесткости и трения механической передачи.

Процедура синтеза САУ методом модального управления для МС с наблюдателем состояния в форме объекта на основе характеристических полиномов контура управления $D(s) = (s + \Omega_0)^3$ и контура подстройки $D^*(s) = (s + \Omega_n)^3$ при заданных значениях $\Omega_0 = 15 \text{ рад/с}$ и $\Omega_n = 40 \text{ рад/с}$ дает следующие параметры РНС:

$$\mathbf{K} = [-2.32 \quad -19.8 \quad -2.76]; \mathbf{L} = [1410.64 \quad -234.135 \quad -102].$$

Результаты моделирования полученной САУ на экспериментальном стенде (рис. 2 а) показывают, что при номинальных параметрах РНС обеспечивается заданное качество управления объектом. Вместе с тем, изменение параметров РНС в пределах $\pm 30\%$ от номинальных значений приводит к потере устойчивости системы.

В целях повышения параметрической грубости системы управления с РНС была использован метод [3], основанный на коррекции сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости модели объекта. В результате была сформирована новая структура наблюдателя состояний с улучшенными системными свойствами, обеспечивающая низкую чувствительность САУ к вариациям параметров РНС. Синтез РНС для полученной структуры наблюдателя на основе приведенных выше полиномов $D(s)$ и $D^*(s)$ дает следующие значения параметров:

$$\mathbf{K} = [-54.151 \quad -14.88 \quad -14.14]; \mathbf{L} = [-0.126 \quad -106.61 \quad -3.57].$$

Как показывают результаты моделирования (рис. 2 б), синтезированная робастная система с РНС обеспечивает устойчивость и заданное качество управления при вариациях параметров РНС в пределах $\pm 30\%$ от номинальных.

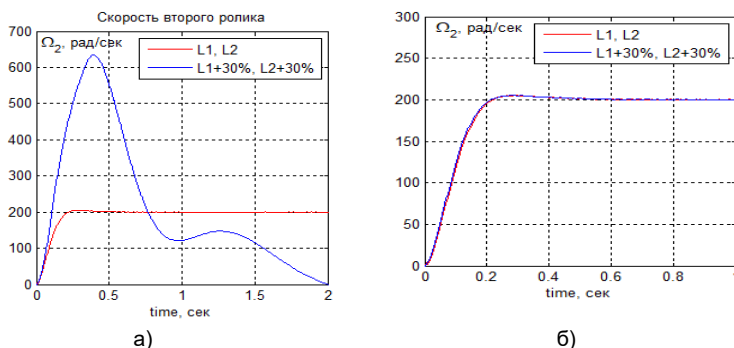


Рис. 2. Переходные характеристики исходной (а) и робастной (б) САУ мехатронным объектом

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность грамианного метода синтеза робастных систем управления с РНС.

Литература

1. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Физическое моделирование упругих механических систем средствами цифрового следящего электропривода // Электротехника. 1999. №3. С. 11-15.
2. Turbo PMAC/PMAC2. Software Reference Manual / Delta Tau Data Systems, Inc, December 19, 2012. 757 p.
3. Anisimov A.A. Synthesizing Parametrically Robust Control Systems with State Controllers and Observers Based on Gramian method / S.V. Tararykin, A.A. Anisimov, A.A. Gerasimov // International Journals of Control, Automation and Systems. 2019. Vol. 17. No. 10. P. 2490-2499.

УДК 681.5.013

А. М. АББЯСОВ, аспирант,
С. В. ТАРАРЫКИН, д.т.н., профессор.

Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
e-mail: alexx.bit@mail.ru

Улучшение робастных свойств мехатронных систем с полиномиальными регуляторами на основе грамианного подхода

Аннотация. Разработан итерационный грамианный метод синтеза робастной мехатронной системы с полиномиальным регулятором «вход-выход».

Ключевые слова: грамианный метод, синтез, полиномиальный регулятор, мехатронная система.

А. М. ABBYASOV, post-graduat,
S. V. TARARYKIN, Doctor of Engineering, Prof.

Ivanovo State Power Engineering University
34, Rabfakovskaya St., 153003 Ivanov
e-mail: alexx.bit@mail.ru

Improving the robust properties of mechatronic systems with polynomial controllers based on the Gramian approach

Abstract. An iterative Gramian method for synthesizing a robust mechatronic system with a polynomial input-output controller has been developed.

Key words: Gramian method, synthesis, polynomial controller, mechatronic system

Во многих отношениях полиномиальные регуляторы (ПР) [1] оказываются равноценной альтернативой регуляторам состояния [2], однако системы автоматического управления (САУ), строящиеся на их основе, могут оказаться более чувствительными к вариациям параметров объекта (ОУ) и самого регулятора.

В качестве объекта исследования примем двухмассовую мехатронную систему (МС) на базе электродвигателя постоянного тока и ПР. Ее структурная схема представлена на рис. 1, где использованы следующие обозначения сигналов и параметров: Ω_3 – заданная скорость, u и U – управляющее и выходное напряжение силового преобразователя (СП), I_a – ток якорной цепи электродвигателя (ЭД), M и M_y – электромагнитный момент и момент упругости; M_c – момент сопротивления, Ω_1 и Ω_2 – угловые скорости первой и второй масс, $K_{сп}$ и $T_{сп}$ – коэффициент передачи и постоянная времени СП, R_a и T_a – активное сопротивление и электромагнитная постоянная времени якорной цепи, C – конструктивная постоянная ЭД, J_1 и J_2 – приведенные моменты инерции ЭД и рабочего органа, $\Delta\varphi$ – разность угловых перемещений первой и второй масс, C_{12} и b_{12} – приведенные коэффициенты жесткости и внутреннего трения кинематической передачи, s – комплексная переменная Лапласа, $R(s)$ и $C(s)$ – полиномы ПР.

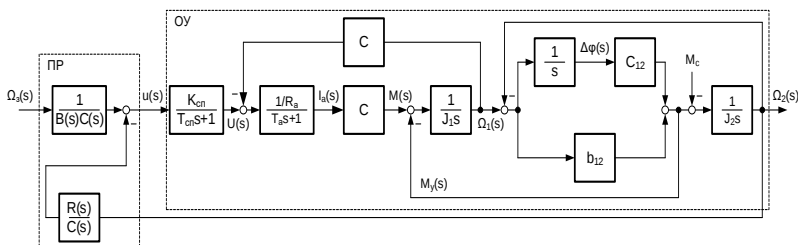


Рис. 1

Поставим задачу исследовать влияние наименее определенного внутреннего параметра объекта на степень его управляемости и наблюдаемости, а также на параметрическую грубость синтезируемой МС; разработать методы улучшения указанных системных свойств ОУ и достижения более высокого уровня робастности мехатронной системы.

В качестве количественных оценок S_U и S_V системных свойств ОУ будем использовать критерии, предложенные в [3].

Синтез ПР будем проводить методом модального управления [2] при заданных параметрах ОУ путем решения полиномиального уравнения вида $A(s)C(s)+B(s)R(s)=D(s)$, где $A(s)$, $B(s)$ – полиномы знаменателя и числителя передаточной функции (ПФ) ОУ; $D(s)$ – желаемый характеристический полином (ХП) ПФ замкнутой системы.

Особые трудности при синтезе робастных МС возникают [3] из-за появления нулей в ПФ объекта. В нашем случае появление действительного нуля обусловливается наличием внутреннего трения в кинематической передаче, характеризуемого параметром b_{12} (рис. 1).

Исследуем влияние b_{12} на системные свойства ОУ и параметрическую грубость синтезируемых МС с использованием соответствующих форм представления результатов в таблице под номерами 1-3 и на рис. 2, а, в, г.

Таблица. Результаты анализа ОУ ($n = 4$) и синтеза ПР при $T_{\sigma} = 0$, $T_a = 13,6$ мс и $b_{12} = \text{var}$

№	b_{12} , Н·м	S_U	S_V	Структура и параметры ПР
1	9,5	$3,58 \cdot 10^3$	12,76	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{5,97 \cdot 10^{-6} s^3 + 1,25 \cdot 10^{-3} s^2 + 0,14 s + 6,79}{10^{-8} s^3 + 1,53 \cdot 10^{-5} s^2 + 9,59 \cdot 10^{-3} s + 1,65}$
2	16,5	$3,58 \cdot 10^3$	16,93	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{4,01 \cdot 10^{-6} s^3 + 1,06 \cdot 10^{-3} s^2 + 0,14 s + 6,83}{10^{-8} s^3 + 1,48 \cdot 10^{-5} s^2 + 8,94 \cdot 10^{-3} s + 1,05}$
3	35	$3,58 \cdot 10^3$	123,82	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{-2,07 \cdot 10^{-6} s^3 - 4,52 \cdot 10^{-3} s^2 - 0,28 s + 5,72}{10^{-8} s^3 + 1,36 \cdot 10^{-5} s^2 + 7,41 \cdot 10^{-3} s + 20,62}$
4	35	981,01	9,06	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{1,42 \cdot 10^{-6} s^3 + 5,15 \cdot 10^{-4} s^2 + 7,51 \cdot 10^{-2} s + 3,83}{10^{-8} s^3 + 1,35 \cdot 10^{-5} s^2 + 7,2 \cdot 10^{-3} s + 0,85}$

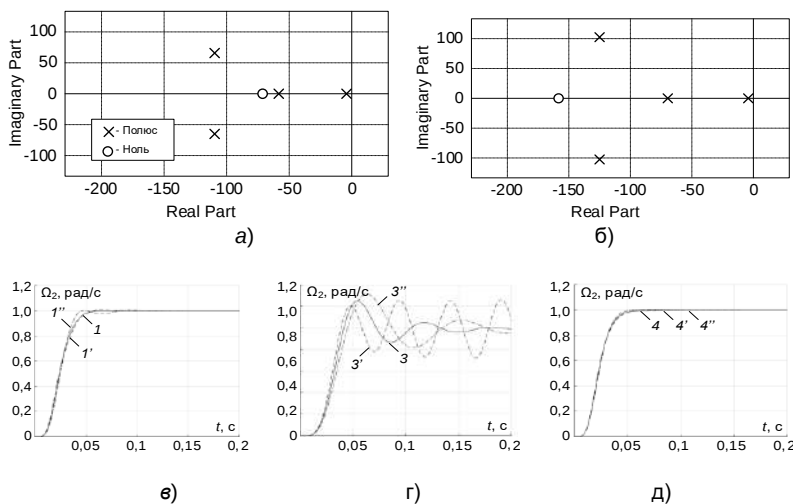


Рис. 2.

Приведенные результаты демонстрируют существенное ухудшение управляемости ОУ и параметрической грубости синтезированной МС

при увеличении b_{12} и соответствующем приближении нуля ПФ объекта к созвездию её полюсов и желаемому СГК синтезируемой системы.

Для разрешения проблемы предлагается использовать грамианный подход [4], основанный на коррекции сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости, формировании соответствующего предрегулятора, преобразующего структуру и параметры расчетной модели объекта в направлении улучшения системных свойств, модального синтеза основного регулятора по улучшенной модели ОУ и редуцировании корректирующего предрегулятора.

В данном случае это позволяет привести исходное расположение нуля и полюсов модели ОУ (рис. 2, а) к виду (рис. 2, б), более благоприятному для последующего синтеза робастной МС.

Соответствующие значения достигаемых показателей управляемости и наблюдаемости скорректированной модели ОУ и результаты последующего модального синтеза основного ПР «вход-выход» приведены в таблице под номером 4, а новые переходные характеристики полученной МС представлены на рис. 2, д.

Поскольку синтез регулятора был проведен по расчетной модели ОУ с улучшенными системными свойствами, это позволило существенно понизить чувствительность МС к отклонениям параметров от модели, в том числе при их реальных исходных значениях.

Литература

1. Крутько П. Д. Полиномиальные уравнения и обратные задачи динамики управляемых систем // Изв. РАН. Техн. кибернетика. 1986. №1. С. 125–133.
2. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М: Машиностроение, 1976. 184 с.
3. Anisimov A. A., Kotov D. G., Tararykin S. V., Tyutikov V. V. Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2011. Vol. 50, N. 5. P. 698–713.
4. Abbyasov A. M. Anisimov A. A., Tararykin S. V. Synthesis of Robust Linear Stationary Dynamic Systems Based on Improvement of the Controllability and Observability of the Computational Model of the Object // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2023. Vol. 62, N. 5. P. 757–773.

УДК 681.5.011

В.В. АПОЛОНСКИЙ, к.т.н., доцент,
С.В. ТАРАРЫКИН, д.т.н, профессор

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

**Управление положением рабочего органа в следящих
мехатронных системах с «упругой» нелинейной кинематикой**

Аннотация. Предложены методы астатического следящего управления мехатронными системами при наличии трудноизмеряемой координаты и нелинейности типа «зазор» в упругой кинематической передаче.

Ключевые слова: мехатронная система, угловое положение, регулятор состояния, следящее управление, упругая передача, зазор.

V.V. APOLONSKIY, Candidate of Technical Sciences,
S.V. TARARYKIN, Doctor of Technical Sciences

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: vlad-apolonskiy@yandex.ru

Position Control of the Actuator in Servo Mechatronic Systems with Nonlinear Elastic Kinematics

Abstract. Methods for astatic tracking control of mechatronic systems are proposed, accounting for a hard-to-measure coordinate and backlash-type nonlinearity in the elastic kinematic transmission.

Key words: mechatronic system, angular position, state regulator, tracking control, elastic transmission, backlash.

Наиболее сложной для мехатронных систем (МС) является задача астатического следящего управления положением рабочего органа (РО) при наличии упругих кинематических передач малой жесткости и нелинейностей в виде механических зазоров [1].

Оценим эффективность и перспективы применения регулятора состояния (РС) расширенного порядка для управления такими МС при отсутствии возможности измерения момента упругости.

Исходя из требования астатизма слежения и учитывая то, что РС формирует в составе обратных связей безынерционную связь по положению вала электродвигателя (ЭД), используем [2] расширенный вектор состояния объекта без учета влияния зазора (рис. 1), где M , M_c – электромагнитный момент и момент сопротивления; Ω_1 , Ω_2 – угловые скорости ЭД и РО; φ_1 , φ_2 – угловые положения ЭД и РО; M_{12} – момент упругости в кинематической передаче, s – переменная Лапласа.

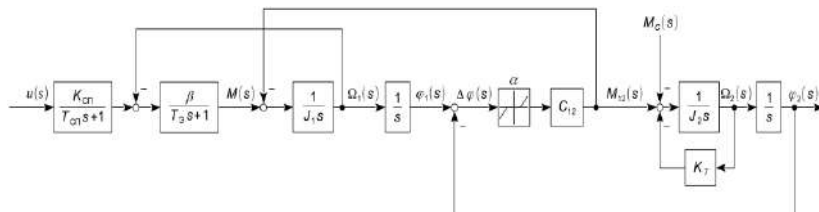


Рис. 1. Структурная схема объекта следящего управления.

Примем следующие числовые значения параметров ОУ: $K_{сп} = 15,7$; $T_{сп} = 0,001$ с – коэффициент усиления и постоянная времени силового преобразователя; $\beta = 0,48$ Н·м·с, $T_{\Sigma} = 0,016$ с, $J_1 = 0,04$ кг·м² – жесткость механической характеристики, электромагнитная постоянная времени и момент инерции ротора ЭД; $J_2 = 0,06$ кг·м² – момент инерции РО, приведенный к валу ЭД; $C_{12} = 10$ Н·м/рад – жесткость кинематической передачи; $K_T = 0,1$ – коэффициент трения.

Задавая выражение желаемого характеристического полинома системы в форме Ньютона $D(s) = (s + \Omega_0)^6$, методом модального синтеза для $\Omega_0 = \dots$ получаем следующие значения коэффициентов расширенного (однократно интегрирующего) РС для модифицированной структуры системы, представленной на рис. 2:

$$K = [k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_6] = [-0,41; -2,14; -114,5; -20,6; -287,2; -2804,3].$$

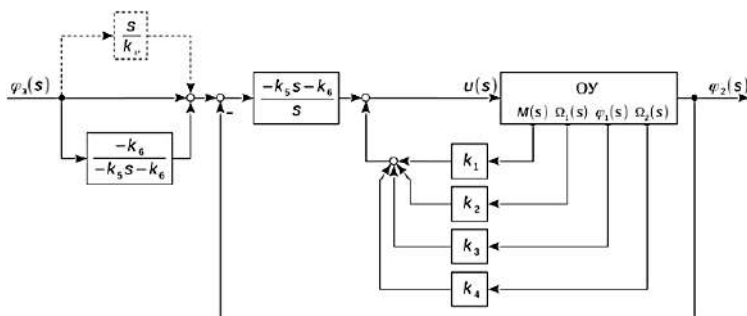


Рис. 2. Структурная схема модифицированной следящей МС

Соответствующая переходная характеристика модифицированной системы и график слежения (без префильтра) за линейно меняющимся сигналом задания положения при отсутствии зазора в механической части, приведены на рис. 3, а, б. Они свидетельствуют о высоком качестве позиционирования и следящего управления, обеспечиваемого линейной системой с однократно интегрирующим РС.

Однако использование такой структуры управления в исходном виде приводит к появлению постоянной статической ошибки слежения за линейно нарастающим задающим сигналом, величина которой определяется темпом слежения и добротностью системы по скорости.

Для устранения этого недостатка в структуру МС (рис. 2) дополнительно вводится (показано пунктиром) канал производной задающего воздействия с коэффициентом, равным обратной величине добротности системы по скорости слежения. При этом использование производной по времени от сигнала задания углового перемещения, реализуемой, например, неявным методом численного интегрирования Эйлера, позволяет определять

темп слежения и корректировать величину регулируемой координаты системы с учетом величины ее добротности по скорости.

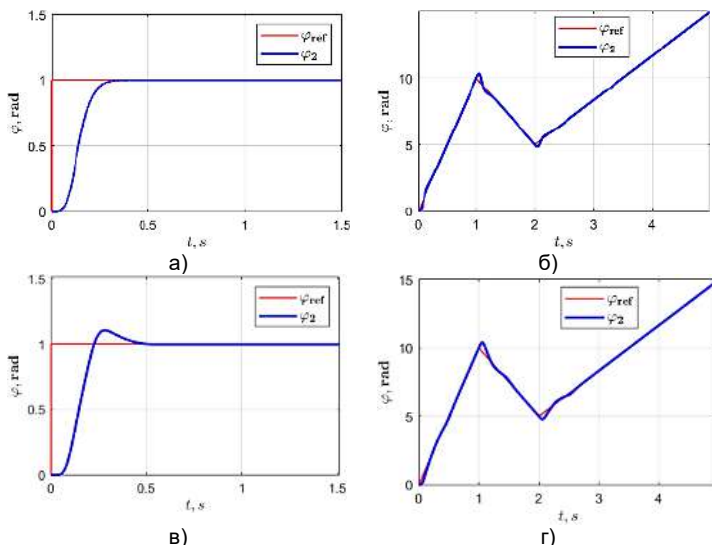


Рис. 3. Переходные характеристики и графики слежения МС на базе РС

Достигнутые результаты и возможности управления иллюстрируются переходной характеристикой и графиками слежения (без префильтра) модифицированной МС с величиной зазора $\alpha = 0,5$ рад, представленными соответственно на рис. 3, в, г.

Вывод. В условиях влияния упругостей кинематических передач, содержащих значительные зазоры, высокие показатели качества следящего управления при отсутствии возможности измерения момента упругой деформации позволяют обеспечить МС на базе расширенных пропорционально-интегральных регуляторов, использующих для формирования управления все основные координаты состояния объекта, а также каналы коррекции выходной координаты по производной задающего воздействия.

Литература

1. Иванков, В.А. Контурно-позиционное управление редукторными электроприводами многоцелевых металлорежущих станков / В.А. Иванков, С.В. Тарарыкин, Е.В. Красильникянц; Федер. агентство по образованию, Иван. гос. энергет. ун-т им. В.И. Ленина. Иваново: ИГЭУ, 2009. 185 с.
2. Тарарыкин, С.В., Аполонский, В.В., Дорожкин, М.С. Методы управления состоянием мехатронных систем без измерения момента упругости механической части / С.В. Тарарыкин, В.В. Аполонский, М.С. Дорожкин // Электротехника. 2025. № 1. С. 46-59.

УДК 621.3.049.77

О.Ю. ГРИГОРЬЕВ¹, магистрант
С.О. КОЖЕВНИКОВ¹, к.т.н., доцент
Л.В. КОЖЕВНИКОВА², к.т.н., доцент

¹ Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

² Ивановский государственный политехнический университет,
г. Иваново, Шереметевский проспект, 21

E-mail: kojevnikov_so@mail.ru

Исследование имитационной модели бесщеточного двигателя постоянного тока в среде matlab

Аннотация. В статье приведена имитационная модель бесщеточного двигателя постоянного тока в среде MATLAB. Целью исследования является определение обратной ЭДС двигателя для контроля скорости, проверки функционирования и определения положения ротора двигателя с целью синтеза системы управления.

Ключевые слова: бесщеточный двигатель, имитационная модель, обратная ЭДС

O.Y. GRIGORYEV¹, student
S. O. KOZHEVNIKOV¹, Ph. D., Associate Professor
L. V. KOZHEVNIKOVA², Ph. D., Associate Professor

¹ Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34

² Ivanovsky State Polytechnic University,
Ivanovo, Sheremetyevo Avenue, 21

E-mail: kojevnikov_so@mail.ru

investigation of a simulation model of a brushless dc motor in the matlab environment

Abstract. The article presents a simulation model of a brushless DC motor in the MATLAB environment. The purpose of the study is to determine the reverse EMF of the engine to control speed, check the operation and determine the position of the engine rotor in order to synthesize the control system.

Key words: Brushless motor, simulation model, reverse EMF

Бесщеточные двигатели постоянного тока (БДПТ), широко используются в промышленности и в быту. Они обеспечивают высокую эффективность и требуют меньших затрат на техническое обслуживание, поэтому во многих областях они заменили обычные двигатели постоянного тока с щеточным приводом. Вращательное движение в БДПТ создается за счет притяжения и отталкивания магнитных полюсов и электромагнитов. Для управления БДПТ требуется контроллер для преобразования постоянного тока в трехфазное напряжение на обмот-

ках. БДПТ имеют важное преимущество перед другими двигателями постоянного тока, т.к. нет проблемы износа щеток, и коммутация обмоток происходит не механически, а с помощью электронной схемы [1]. Для анализа работы и дальнейшей разработки системы управления двигателем разработана имитационная модель, позволяющая выполнить анализ функционирования при различных режимах нагружения (рис. 1) [2,3].

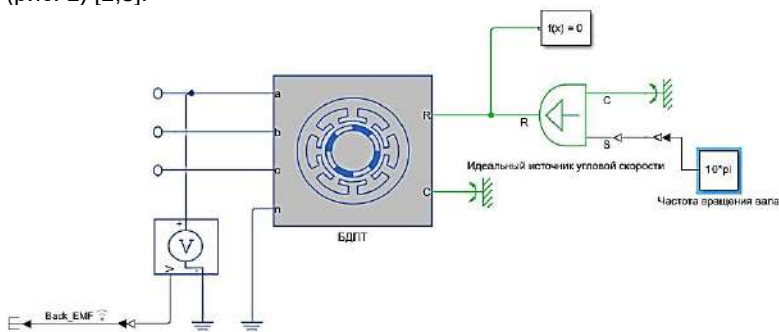


Рис. 1. Имитационная модель БДПТ двигателя в среде MATLAB

Имитационная модель включает в себя следующие подсистемы: инвертор, датчик положения, блок коммутационной логики. Инвертор необходим для преобразования постоянного тока в трехфазный, поступающий на обмотки двигателя. Датчик положения имитирует работу трех датчиков Холла, которые обычно располагают внутри двигателя и передают информацию о том в каком из шести секторов находится ротор. Данные о положении ротора приходят на блок коммутационной логики. Он определяет какие ключи инвертора нужно активировать в данный момент, чтобы обеспечить непрерывное вращения двигателя.

Одной из задач имитационного моделирования БДПТ является определение обратной ЭДС двигателя и преследует несколько целей:

- контроль скорости. Когда двигатель достигает максимальной скорости, обратная ЭДС практически уравнивает напряжение питания, и двигатель без нагрузки потребляет небольшой ток. При добавлении нагрузки скорость и обратная ЭДС падают, позволяя току увеличиться, и двигатель производит полезную мощность;
- проверка функционирования двигателя;
- определение положения ротора двигателя с целью синтеза системы управления.

На рис. 2 приведены результаты моделирования вращения вала двигателя с постоянной скоростью при разомкнутых клеммах на всех трех фазах. Измеренное напряжение, создаваемое на одной из фаз, позволяет наблюдать обратную ЭДС.

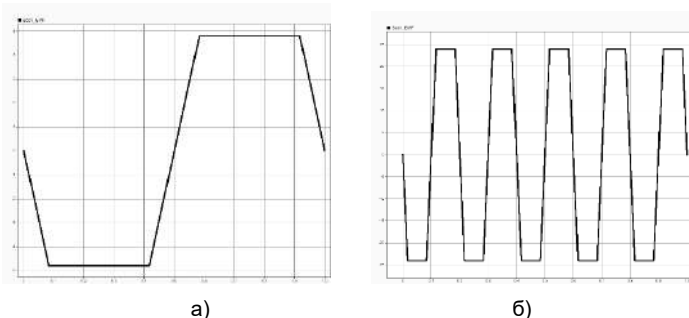


Рис. 2. Результат моделирования для частоты вращения вала:
а – 10 мин⁻¹; б – 100 мин⁻¹

Имитационная модель позволит синтезировать систему управления БДПТ и необходима в дальнейших исследованиях при разработке лабораторного стенда.

Литература

1. Introduction to Brushless DC Motor Control [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/campaigns/offers/next/introduction-to-brushless-dc-motor-control.html>
2. Training Project on Implementing a BLDC Motor Controller with Simscape Electrical and Stateflow [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/icub-tech-iit/training-matlab-bldc-controller/blob/main/README.md>
3. Кожевников С.О. Микроконтроллерная система управления аппаратом для получения смазочно-охлаждающей жидкости/Кожевников С.О., Кожевникова Л.В. Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения). Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бенардосом. Иваново, 2021. С. 140-143.

УДК 621.3.049.77

К.А. КОЛПАКОВ¹, студент
С.О. КОЖЕВНИКОВ¹, к.т.н., доцент
Л.В. КОЖЕВНИКОВА², к.т.н., доцент

¹ Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

² Ивановский государственный политехнический университет,
г. Иваново, Шереметевский проспект, 21
E-mail: kojevnikov_so@mail.ru

Термометр для изучения теплотехнических свойств строительных материалов

Аннотация. В статье предложено устройство на базе микроконтроллера для измерения температуры в печи обжига с целью исследования теплотехнических

параметров строительных материалов. Приведена структурная схема устройства и описание его работы. Отличительной особенностью предлагаемого устройства является наличие карты памяти для хранения измеренной температуры.

Ключевые слова: термометр, микроконтроллер, строительный материал

K.A. KOLPAKOV¹, student
S.O. KOZHEVNIKOV¹, Ph.D., Associate Professor
L.V. KOZHEVNIKOVA², Ph.D., Associate Professor

¹Ivanovsky State Power Engineering University ,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34

²Ivanovsky State Polytechnic University,
Ivanovo, Sheremetyevo Avenue, 21

Thermometer for studying the thermal properties of building materials

Abstract. The article proposes a device based on a microcontroller for measuring the temperature in a furnace in order to study the thermophysical parameters of building materials. The structural scheme of the device and the algorithm of its operation are given. A distinctive feature of the proposed device is the presence of a memory card for storing the measured temperature.

Key words: thermometer, microcontroller, building material

В процессе производства кирпича-сырца из минеральных промышленных отходов критичными факторами, влияющими на качество изделий наряду с давлением прессования, фракционным составом шихты является температура обжига [1].

Во многих исследованиях отмечено невысокое качество глинистых пород части месторождений Российской Федерации. Проводятся исследования по применению минерального техногенного сырья в производстве стеновых керамических материалов. При этом решаются проблема сырьевой базы отрасли и в то же время способствуется решение проблем охраны окружающей среды. Получение стеновых керамических строительных материалов из техногенного сырья невозможно без использования новых технологических подходов, в том числе в процессе их обжига [1]. Для выбора оптимальных режимов обжига изделий из различного вида техногенного сырья необходимы исследования с применением различного оборудования: печи для обжига и термометров. Сложность снятия температурных профилей заключается в необходимости синхронного снятия показаний температуры и в специфическом расположении термозондов (рис.1) [1].

Основными параметрами при обжиге керамических стеновых материалов являются температура и скорость нагрева, и необходимость одновременной фиксации вышеуказанных параметров. В соответствии со схемой для контроля температурно-временных показателей, авторами предлагается функциональная схема трехканального термометра

с выводом значений на дисплей и одновременной записью значений на карту памяти (рис.2).

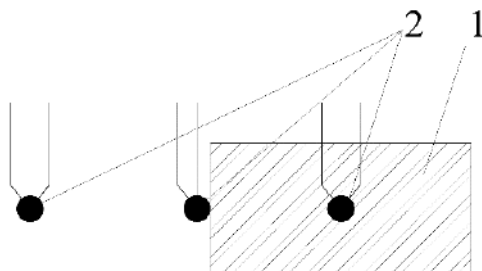


Рис. 1. Расположение термозондов в контролируемом образце:
1 – исследуемый материал; 2 – термозонд



Рис. 2. Структурная схема термометра

Основой термометра является микроконтроллерная плата Arduino UNO к которой подключены три модуля преобразователя температуры MAX31855, OLED дисплей, модуль карты памяти и часы реального времени. В качестве термозондов применены термопары К-типа с пределом измеряемой температуры 1200°C. Измеренная с помощью термозондов температура преобразовывается аналогово-цифровым преобразователем и по интерфейсу SPI передается на Arduino UNO. Значения температуры в реальном времени выводятся на дисплей и одновременно фиксируются на карте памяти в виде файла с расширением txt. Данные температуры и времени, записанные в файл можно обработать и построить необходимые диаграммы [2,3].

Таким образом, предлагаемый термометр позволит повысить точность измеряемой температуры с учетом часов реального времени и выполнить исследования по определению оптимальных параметров

обжига образцов стеновых керамических материалов. Кроме того, при необходимости количество измеряемых каналов температуры может быть увеличено за счет применения мультиплексора.

Литература

1. Столбоушкин, А.Ю. Стеновые керамические материалы матричной структуры на основе неспекающегося малопластичного техногенного и природного сырья. 05.23.05 «Строительные материалы и изделия»: автореф. д.т.н. Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. Томск, 2015. 43 с.
2. Блум Джереми. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства. СПб.: БХВ-Петербург, 2015. 336 с.
3. Кожевников С.О. Микроконтроллерная система управления аппаратом для получения смазочно-охлаждающей жидкости/Кожевников С.О., Кожевникова Л.В. Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бернардосовские чтения). Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бернардосом. Иваново, 2021. С. 140-143.

УДК 62-50-83

А.А. АНИСИМОВ, д.т.н.,
М.Е. СОРОКОВНИН, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская, 34
e-mail: anis-2012@yandex.ru, marki_1997@mail.ru

Идентификация нелинейных мехатронных систем при помощи искусственных нейронных сетей

Аннотация. В работе рассматривается параметрическая идентификация нелинейной мехатронной системы при помощи искусственной нейронной сети. Предлагается подход, позволяющий повысить точность идентификации путем формирования оптимальной структуры сети.

Ключевые слова: нелинейные мехатронные системы, идентификация параметров, искусственная нейронная сеть.

А.А. ANISIMOV, Doctor of Engineering,
М.Е. SOROKOVNIN, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
e-mail: anis-2012@yandex.ru, marki_1997@mail.ru

Identification of a nonlinear mechatronic systems using anartificial neural networks

Abstract. The paper considers parametric identification of a nonlinear mechatronic system using an artificial neural network. An approach is proposed to improve the accuracy of identification by forming an optimal network structure.

Key words: nonlinear mechatronic systems, parameter identification, artificial neural network

Одним из факторов, усложняющих совершенствование и развитие мехатронных систем, является влияние нелинейных эффектов в различных частях технологических объектов управления. Наличие нелинейностей существенно затрудняет анализ и синтез современных систем, ограничивает возможность достижения высоких показателей качества управления [1].

Компенсация влияния указанных эффектов средствами управляющего устройства требует знания параметров как линейных, так и нелинейных элементов системы, что делает актуальной проблему идентификации мехатронных объектов.

Ранее для решения задачи параметрической идентификации мехатронных систем был предложен интеллектуальный метод, основанный на применении радиальной искусственной нейронной сети (ИНС), обладающий значительными преимуществами по сравнению с классическими методами [2].

При этом наличие широкополосных помех в каналах измерения координат состояния, а также влияние неучтенных нелинейных эффектов снижает эффективность предлагаемой методики. В связи с этим возникает задача повышения точности идентификации мехатронных систем управления в указанных условиях.

Для успешного обучения ИНС при формировании выборки рекомендуется варьировать переменные параметры как линейной части, так и нелинейных элементов модели объекта, предварительно определив диапазон их возможных изменений на основе априорной информации.

Выбор состава координат состояний $_i$, поступающих на входы ИНС при идентификации параметра θ_j , предлагается выполнять на основе отношения мощностей полезного сигнала (Sx_i) и помехи (Sn_i):

$$F_i\{\theta_j\} = \frac{Sx_i(\theta_j)}{Sn_i} . \quad (1)$$

Мощность информационного сигнала координаты состояния оценивается по среднеквадратическому значению разности:

$$Sx_i(\theta_j) = \frac{1}{T} \int_0^T u_{ij}^2(t, \theta^0, \Delta\theta_j) dt , \quad (2)$$

где $u_{ij}(t, \theta^0, \Delta\theta_j) = x_i(t, \theta^0) - x_i(t, \theta^0 + \Delta\theta_j)$; T – интервал времени измерения; θ^0 – вектор номинальных значений параметров линейных и нелинейных элементов; $\Delta\theta_j$ – вектор отклонений параметров.

Значение критерия (1) вычисляется для каждого неизвестного параметра объекта, на основе чего определяется оптимальная координата, дающая максимальное значение этого критерия. Далее выполняется объединение наиболее эффективных каналов измерения координат

для множества переменных параметров линейной части и нелинейных элементов. Сигналы с этих каналов составляют обучающую выборку.

Эффективность предложенной методики показана на примере электропривода с упругой кинематической передачей, содержащей нелинейный элемент (НЭ) типа зазор, со следующими параметрами (рис. 1): $J_1 = 0,04 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $J_2 = 0,06 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – моменты инерции двигателя и рабочего органа, $C_{12} = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $K_T = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ – коэффициенты жесткости и трения; $C = 1 \text{ Вб}$ – конструктивный параметр двигателя; $T_a = 0,016 \text{ с}$, $R_a = 2,08 \text{ Ом}$ – постоянная времени и сопротивление якорной цепи; $K_{сп} = 15,7$ и $T_{сп} = 0,01 \text{ с}$ – коэффициент передачи и постоянная времени СП; $\alpha = 0,05 \text{ рад}$ – величина зазора.

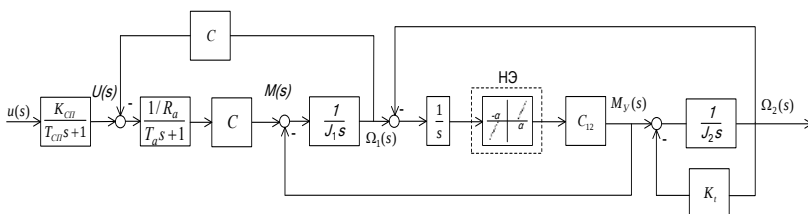


Рис. 1. Структурная схема электропривода с зазором

Оценки мощности информационных сигналов координат состояния M , Ω_1 , M_y , Ω_2 при изменениях неизвестных параметров объекта C_{12} , J_2 и α в диапазоне $\pm 50\%$ на временном интервале $(0 \dots 0,7)$ с и соответствующие значения критерия (1) приведены в табл. 1. Максимальное значение критериев F_i по всем параметрам дает координата M_y . Таким образом, на вход ИНС подается сигнал только с этой координаты.

Таблица 1. Оценки энергий информационного сигнала и критерия (1)

Координата	$Sx(C_{12}),$ Bm	$Sx(J_2),$ Bm	$Sx(\alpha),$ Bm	$Sn(x_i),$ mBm	$F_i\{C_{12}\}$	$F_i\{J_2\}$	$F_i\{\alpha\}$
M	0,0366	0,1249	0,0836	100	0,366	1,249	0,836
Ω_1	0,5505	0,567	1,04	100	5,505	5,67	10,4
M_y	11,1	0,6773	15,16	100	111	6,773	151,6
Ω_2	0,2186	0,5548	0,404	100	2,186	5,548	4,04

Для формирования структуры радиальной ИНС используется адаптивный алгоритм *newrb* программного комплекса *MatLab*. Обучающая выборка представляет собой массив дискретных по времени ($T_0 = 0,005 \text{ с}$) значений 250 переходных характеристик объекта управления, полученных при вариации переменных параметров в пределах $\pm 50\%$.

Сравнение средней погрешности идентификации $\hat{\sigma}_\Sigma$ по всем переменным параметрам для разных сочетаний каналов измерения на

входе сети (табл. 2) показывает, что наименьшую погрешность идентификации дает вариант ИНС, оптимальный по предложенному критерию.

Таблица 2. **Результаты идентификации при различных вариантах ИНС**

1 координата		2 координаты		3 координаты		4 координаты	
	$\hat{\sigma}_y \cdot 10^{-2}$		$\hat{\sigma}_y \cdot 10^{-2}$		$\hat{\sigma}_y \cdot 10^{-2}$		$\hat{\sigma}_y \cdot 10^{-2}$
[M]	165,13	[M Ω_1]	14,46	[M $\Omega_1 M_y$]	6,07	[все]	6,71
[Ω_1]	14,59	[M M $_y$]	5,51	[$\Omega_1 M_y \Omega_2$]	6,03		
[M $_y$]	5,03	[M Ω_2]	17,62	[M M $_y \Omega_2$]	6,13		
[Ω_2]	32,34	[$\Omega_1 M_y$]	5,52	[M $\Omega_1 \Omega_2$]	10,84		
		[$\Omega_1 \Omega_2$]	13,18				
		[M $_y \Omega_2$]	5,61				

Предлагаемая методика формирования ИНС оптимальной структуры позволяет снизить погрешность идентификации параметров как линейных, так и нелинейных элементов мехатронных систем в условиях воздействия помех в каналах измерения.

Литература

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления – Санкт-Петербург: Профессия, 2003. 752 с.
2. Анисимов А.А., Сороковнин М.Е., Тарарыкин С.В. Нейросетевая идентификация и настройка мехатронных систем с регуляторами состояния // Мехатроника, автоматизация, управление. 2025. №26, С. 65–76.

УДК 62-503.57

Л. Г. КОПЫЛОВА, к.т.н., доцент,

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

Синтез электромеханической системы, инвариантной к трехкомпонентным гармоническим возмущениям момента нагрузки

Аннотация. Разработана селективно-инвариантная электромеханическая система, реализующая адаптацию к изменениям уровня скорости при воздействии трехкомпонентных гармонических возмущений момента нагрузки.

Ключевые слова: электромеханическая система, компенсация гармонических возмущений, принцип внутренней модели, селективная инвариантность, адаптация.

L. G. KOPYLOVA, Candidate of Engineering,

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

Synthesis of an electromechanical system invariant to three-component harmonic disturbances of the load torque

Abstract. A selectively invariant electromechanical system has been developed that implements adaptation to changes in the speed level under the influence of three-component harmonic disturbances of the load torque.

Key words: electromechanical system, harmonic disturbance compensation, internal model principal, selective invariance, adaptation.

Высокие показатели качества селективно-инвариантных (СИ) электромеханических (ЭМС) в обработке управляющих и возмущающих воздействий были достигнуты [1] при доминировании постоянной и колебательной составляющих момента нагрузки электродвигателя (ЭД) с частотой вращения главного рабочего органа (РО) и неизменной амплитудой, которые, как показано в [2], могут формироваться в механической части системы с неуравновешенной массой и эксцентриситетом РО. В то же время исследованиями [2] было показано, что при определенных условиях в таком объекте могут возникать дополнительные колебания момента нагрузки ЭД с двойной частотой относительно угловой скорости РО и прямой квадратичной зависимостью амплитуды от угловой скорости электропривода (ЭП).

В этом случае колебания момента сопротивления ЭД становятся трехкомпонентными с постоянной составляющей M_0 и амплитудами M_1 и M_2 первой и второй гармоник, определяя суммарный момент нагрузки как функцию времени t :

$$M_H(t) = M_0 + M_1 \sin(\omega_1 t) + M_2 (\omega_1) \sin(\omega_2 t), \quad (1)$$

где $\omega_1 = \Omega/i$ – угловая скорость РО, Ω – частота вращения ЭД, i – передаточное отношение редуктора (при наличии), $\omega_2 = 2\omega_1$.

Согласно принципу селективной инвариантности [3, 4], характеристический (формирующий) полином объединенной математической модели возмущения (1), вводимый в знаменатель передаточной функции (ПФ) единого регулятора, определяется как

$$G(s) = s \cdot (s^2 + \omega_1^2)(s^2 + \omega_2^2) = s \cdot G_1(s) \cdot G_2(s). \quad (2)$$

В одноконтурной ЭМС (рис. 1) объединенный регулятор с такой моделью возмущения приобретает интегральную и две колебательные компоненты, которые при наличии отрицательной обратной связи в совокупности обеспечивают нулевую статическую ошибку от действия постоянной составляющей нагрузочного момента и противофазную

компенсацию его гармонических составляющих в установившемся режиме работы.

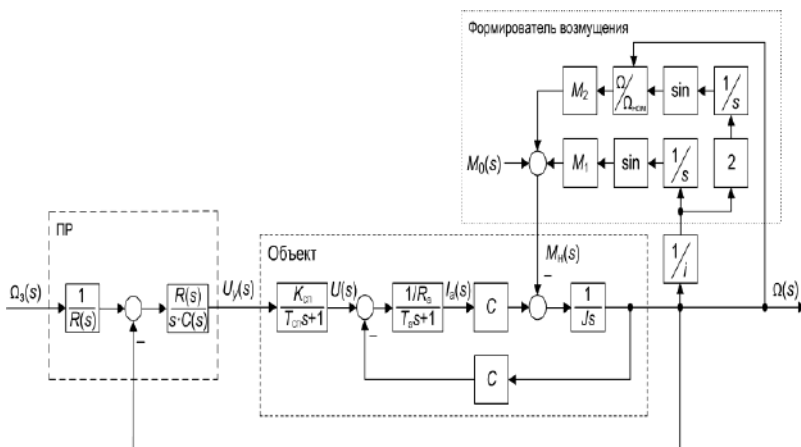


Рис. 1. Структурная схема одноконтурной ЭМС

Однако анализируя полученное выражение характеристического полинома (2), приходим к выводу о том, что степень сложности формируемого на его основе объединенного полиномиального регулятора (ПР), даже в неадаптивной версии, существенно возрастает. Это затрудняет динамическую коррекцию и повышает чувствительность ЭМС к вариациям внутренних параметров, а также существенно усложняет адаптацию регулятора к изменениям уровня скорости ЭП.

Упрощение управляющего устройства системы было выполнено путем разделения модели возмущения на три составляющие формирования соответственно трех подсистем управления – внутренней, средней и внешней, как это показано на рис. 2. Синтез трехконтурной системы управления был произведен согласно принципу редуцирования каскадных регуляторов селективно-инвариантных систем путём корректировки степени локализации внутренних контуров управления.

В этом случае методом модального управления для внутренней (самой быстрой) подсистемы синтезируется астатический регулятор состояния (РС). Высокое быстродействие внутренней подсистемы дает основание представить ее безынерционной при расчете ПР среднего контура управления, с помощью которого выполняется компенсация второй гармонической составляющей возмущения путём введения ее математической модели $G_2(s)$ в знаменатель ПФ регулятора. Затем осуществляется аппроксимация среднего (достаточно быстрого) контура аperiодическим звеном первого порядка и синтезируется ПР внеш-

него контура, знаменатель ПФ которого включает математическую модель $G_1(s)$ первой гармонической составляющей возмущения.

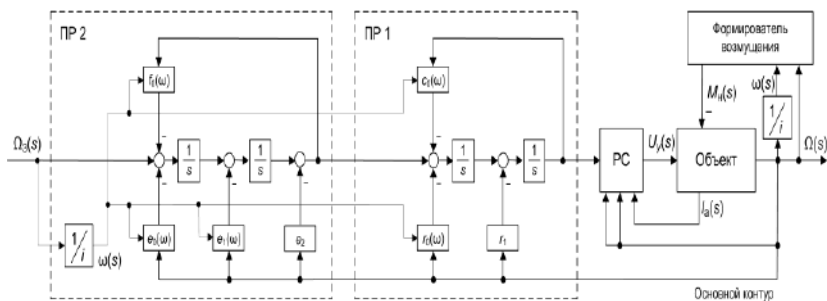


Рис. 2. Структурная схема адаптивной трехконтурной ЭМС

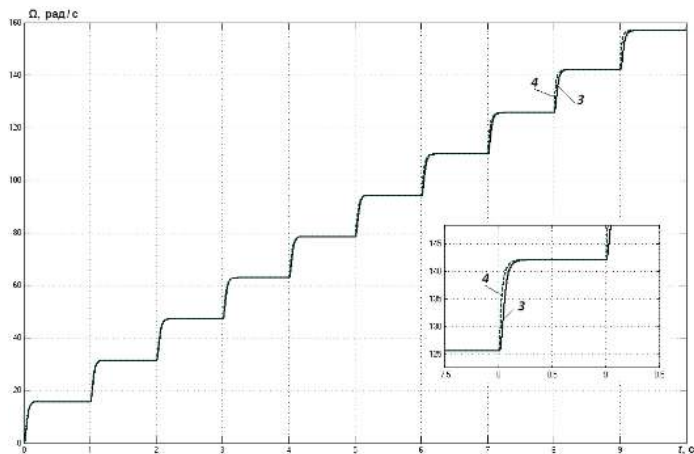


Рис. 3. Каскадные переходные характеристики адаптивной трехконтурной ЭМС

Принятое разделение модели возмущения на три составляющие приводит к максимальному упрощению отдельных звеньев полученного каскадного регулятора. Это предельно облегчает их адаптивную реализацию при вариациях уровня рабочей скорости, а при реализации в объединенной канонической форме наблюдаемости [5] позволяет также понизить общий порядок ПР.

Соответствующие результаты моделирования системы в виде графиков обработки каскадного управляющего воздействия и трехкомпонентного возмущения по моменту нагрузки ЭП представлены рис. 3. Они

свидетельствуют о полном выполнении системой основных технических требований на всех скоростях рабочего диапазона ЭП.

Литература

1. Тарарыкин С.В. Структурно-параметрический синтез и цифровая реализация регуляторов мехатронных систем, под ред. С.В. Тарарыкина / С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков, А.А. Анисимов, Л.Г. Копылова, В.В. Аполонский. Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2019.
2. Тарарыкин С.В. Особенности возникновения и компенсации колебаний моментов нагрузки электродвигателей в электромеханических системах / С.В. Тарарыкин, Л.Г. Копылова // Вестник машиностроения. 2019. №11.
3. Кулебакин В.С. Об основных задачах и методах повышения качества автоматического регулирования систем / В.С. Кулебакин // Тр. II Всес. совещ. по теории автоматического регулирования. Т. II. М.: Наука, 1965.
4. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
5. Аполлонский В.В. Разработка и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с адаптацией регуляторов к изменениям уровня скорости / В.В. Аполонский, Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. №5.

СЕКЦИЯ 10.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 004.94

В.Е. РОЗИН, аспирант,
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор
А.В. СТУЛОВ, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет
153003 г. Иваново, Рабфаковская улица, 34
E-mail: kalmar20006@mail.ru, aitispu@mail.ru, alxstl@mail.ru

САПР преобразовательных трансформаторов

Аннотация. Разработана расчетная подсистема САПР преобразовательных трансформаторов. Отличительными особенностями САПР является уточненный расчет напряжения короткого замыкания, тепловой расчет с использованием цепных моделей и оптимизация расчета с применением генетического алгоритма.

Ключевые слова: преобразовательный трансформатор, САПР, проектирование трансформаторов.

V.E. ROZIN, graduate student,
A.I. TIKHONOV, Doctor of Engineering,
A.V. STULOV, Ph.D.

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: kalmar20006@mail.ru, aitispu@mail.ru, alxstl@mail.ru

CAD of conversion transformers

Abstract. A calculation subsystem of the CAD system for converter transformers has been developed. Distinctive features of the CAD system are a refined calculation of short-circuit voltage, thermal calculation using chain models, and calculation optimization using a genetic algorithm.

Key words: transformer converter, CAD, transformer design.

Преобразовательный трансформатор – это трансформатор, предназначенный для работы в выпрямительных, инверторных и других установках, преобразующих систему переменного тока в систему постоянного тока и наоборот. В настоящее время преобразовательные трансформаторы находят применение в мощных промышленных электроприводах и электротранспорте, частотно-регулируемых приводах, устройствах плавного пуска, системах возбуждения генераторов.

ров, установках электролиза и других устройствах, что делает актуальной задачу их точного и эффективного проектирования.

Характерной отличительной особенностью преобразовательных трансформаторов выступает сложная схема соединения вторичных (вентильных) обмоток, необходимая для создания большого количества фаз, что необходимо для снижения пульсаций выпрямленного напряжения. Примером такого трансформатора может служить 24-фазная схема (рис. 1). В схеме присутствует 4 секции вентильной обмотки, две из которых соединены по схеме «треугольник с продолженными сторонами».

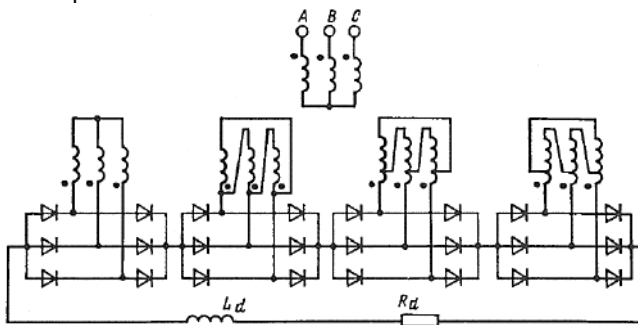


Рис. 1. 24-фазная схема преобразовательного трансформатора с последовательным соединением мостов

В разработанной САПР имеется возможность проектирования реализации на вторичной стороне 6, 12, 18, 24, 30, 36, 48, 54 и 60 фаз. Для этого рассчитывается точное соотношение витков в продолженных треугольниках вентильной обмотки. Например, в 30-фазном трансформаторе на вторичной стороне реализуется один полный треугольник и 4 треугольника с продолженными сторонами (рис. 2).

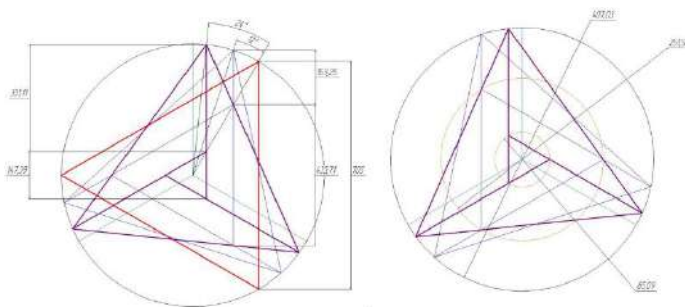


Рис. 2. Треугольники ЭДС фаз вентильной обмотки

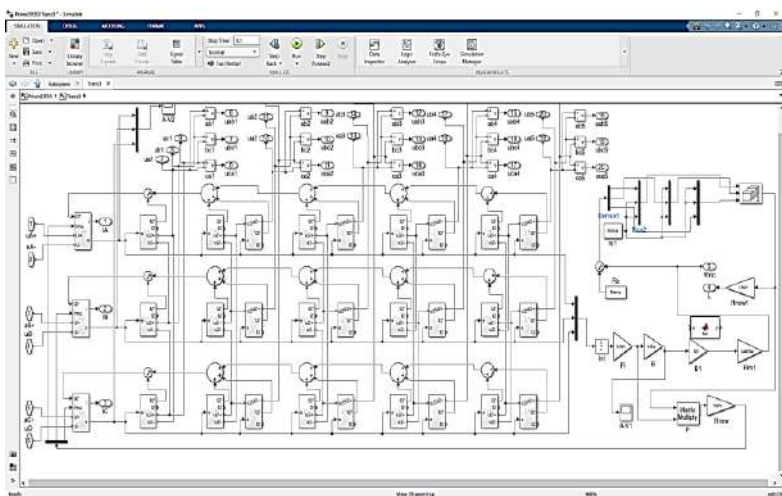


Рис. 3. Модель 30-азного преобразовательного трансформатора

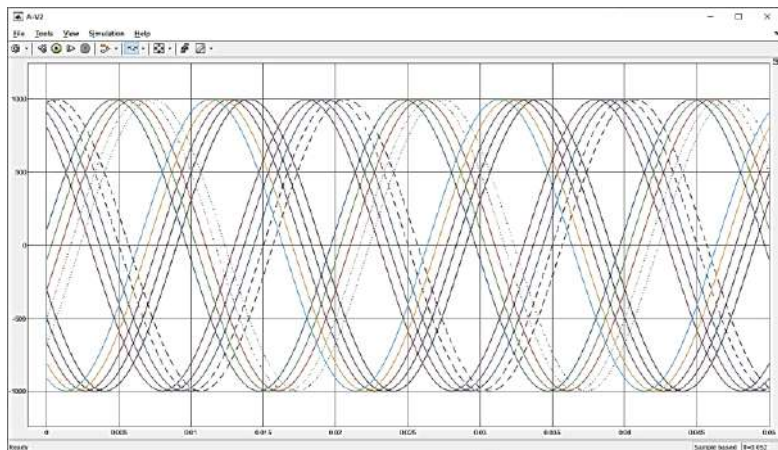


Рис. 4. Кривые фазных напряжений на выходе 30-фазного преобразовательного трансформатора

Для реализации расчетной части САПР был использован программный комплекс MatLAB, интерфейсная часть выполнена в Microsoft Excel. Расчет ведется в трех режимах: пакетный режим по заданному техническому заданию с принятием решений путем обращения к справочной подсистеме, режим оптимизации проекта с ис-

пользованием генетических алгоритмов, уточненный режим с интерактивным принятием ответственных решений.

Особенностью САПР является использование комбинации из цепных и полевых моделей. В частности, расчет напряжения короткого замыкания осуществляется с использованием конечно-разностной модели катушек с произвольным (даже дробным) числом витков, в которых учитывается взаимное влияние катушек по полям за пределами магнитопровода. Тепловой расчет выполняется с использованием электрических схем замещения тепловых процессов. Для уточненного расчета режимов работы спроектированного устройства используется имитационная модель преобразовательной установки, реализованная в среде MatLab Simulink.

В частности, на рис. 3 приведена структурная схема имитационной модели 30-фазного трансформатора. На рис. 4. приведены кривые напряжений на выходе трансформатора. Имитационная модель может работать в составе модели преобразовательной установки.

УДК 621.313

М.С. ФАДЕЕВА, аспирант
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

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

Использование имитационной термодинамической модели в САПР трансформаторов

Аннотация. Разработан алгоритм, позволяющий моделировать ключевые термодинамические процессы, как в идеальных, так и в реальных газах. Приведены практические и учебные задачи, решение которых возможно в рамках применения имитационной термодинамической модели.

Ключевые слова: расчет термодинамических процессов, молекулярная физика, имитационное моделирование.

¹M.S. FADEEVA, Postgraduate Student
²A.I. TIKHONOV, Doctor of Technical Sciences, Professor

^{1,2} Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

²Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry
of Emergency Situations of Russia

E-mail: fadeeva-mc@yandex.ru¹, aitispu@mail.ru²

Using a Thermodynamic Simulation Model in Transformer CAD

Abstract. An algorithm has been developed that allows modeling key thermodynamic processes in both ideal and real gases. Practical and educational tasks are

given that can be solved within the framework of using a simulation thermodynamic model.

Key words: calculation of thermodynamic processes, molecular physics, simulation modelling.

Одной из главных проблем, возникающих при проектировании электромеханических устройств, в частности, силовых трансформаторов, является проблема теплового расчета. Точность теплового расчета во многом определяется точностью задания параметров охлаждающей среды. Моделирование конвективных процессов, как правило, осуществляется путем решения уравнения Навье-Стокса. Для упрощения математического аппарата предлагается использовать имитационную модель, построенную на современных физических представлениях о строении вещества, выраженных в молекулярно-кинетической теории идеального газа (МКТ ИГ), а также на положениях теории подобия.

Компьютерная модель, которая воспроизводит поведение или характеристики реальной системы во времени, называется имитационной. Модель позволяет описать состояние термодинамической системы (ТДС) без решения системы уравнений в частных производных.

Имитационная модель ТДС функционирует в программном пакете MatLab. Главным фактором, оказавшим влияние при выборе среды моделирования, стал мощный инструментальный матричного анализа.

Модель представляет собой цилиндр, заполненный идеальным газом, закрытый подвижным поршнем (рис. 1).

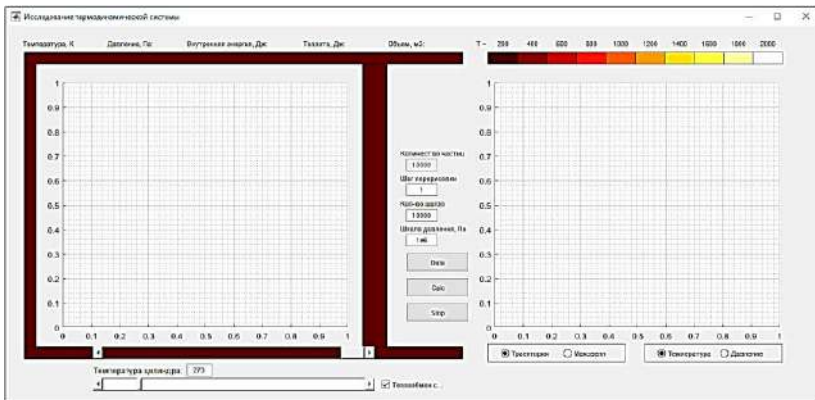


Рис. 1. Система имитационного моделирования термодинамической системы

Модель основана на множестве элементов (частиц), являющихся аналогами молекул идеального газа. Количество частиц в системе, их масса и скорость перемещения по пространству цилиндра с связаны с

соответствующими параметрами газа масштабами подобия. Масштабы подобия рассчитываются в точном соответствии с положениями первой теоремы подобия.

Движение частиц не учитывает взаимного соударения. Вместо этого каждая i -я частица совершает броуновское движение с длиной свободного пробега, которая связана с реальной длиной свободного пробега с помощью формулы, предлагаемой МКТ ИГ. В частности, на рис. 2, а приведена траектория одной из частиц ТДС.

Скорость движения частиц модели на прямолинейном участке траектории выбирается исходя из температуры газа T в соответствии с распределением Максвелла:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}. \quad (1)$$

Кривая Максвелла (рис. 2, б) задается для границ подобласти и может пересчитываться при изменении температуры. При соударении частиц с границами подобласти происходит обмен энергией между границей и частицей. При этом частица либо получает энергию от границы расчетной области, либо отдает часть энергии. Энергообмен осуществляется с учетом масштабов подобия, что позволяет математически точно имитировать данный процесс.

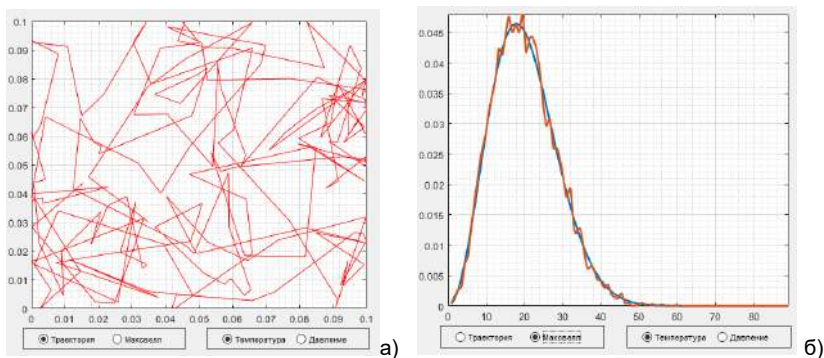


Рис. 2. а) распределение молекул по скоростям при количестве элементов 10000 и $T = 524$ К: оранжевая линия – модель; синяя линия – расчет по (1); б) построение траектории движения

Использование положений теории подобия позволяет не только воспроизводить процессы и термодинамические циклы в идеальном газе, но и снимать точные значения температуры и давления в отдельных секторах ТДС, внутреннюю энергию газа и теплоту, передаваемую

через стенку цилиндра газу и в окружающую среду, а также вычислять силу, действующую на поршень и объем цилиндра под поршнем.

Работа является продолжением работы [1]. В новой версии система функционирует в среде MatLab, что дает возможность ее дальнейшего развития с использованием математической библиотеки данного пакета. В частности, в настоящее время решается задача имитации конвекции, что позволит имитировать процесс конвективного охлаждения элементов моделируемых устройств.

В дальнейшем предполагается совместить данную модель с системой расчета теплового поля в обмотках трансформатора методом конечных разностей [2].

Литература

1. Севрюгов Д.М., Тихонов А.И. Разработка модели термодинамической системы на основе теории подобия и метода Монте-Карло в технологии параллельных вычислений CUDA // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2014. Вып. 1. С. 81-85.
2. Фадеева, М.С. Имитационное моделирование физических полей на основе метода конечных разностей / К.В. Семенова, А.И. Тихонов, М.С. Фадеева // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXII Бенардосовские чтения), посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета 31 мая – 2 июня III том Электротехника Иваново: ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. с. 248-250.

УДК 621.313

А.И. ТИХОНОВ, д.т.н.; профессор,
А.В. СТУЛОВ, к.т.н.;
Д.А. ТИХОНОВ, соискатель;
Н.В. ПРОХОРОВА, соискатель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: aitispu@mail.ru, alxstl@mail.ru,
kelleam@yandex.ru, klen7308@mail.ru

Разработка технологической платформы для создания САПР электротехнических устройств

Аннотация. Разработана подход к созданию расчетных подсистем САПР электротехнических устройств. Данный подход проиллюстрирован на примере САПР асинхронных машин.

Ключевые слова: САПР электрических машин, цепные модели физических процессов, модели физических полей.

A.I. TIKHONOV, Doctor of Technical Sciences; professor,
A.V. STULOV, Ph.D.;
D.A. TIKHONOV, applicant;
N.V. PROKHOROVA, applicant

¹Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34

²National Research Technological University "MISIS"
119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, building 1

E-mail: aitispu@mail.ru¹, marina.serzhantova@gmail.com²

Development of a technological platform for creating CAD systems for electrical devices

Abstract. An approach to creating calculation subsystems for CAD systems for electrical devices has been developed. This approach is illustrated using the example of CAD systems for asynchronous machines.

Key words: CAD systems for electrical machines, chain models of physical processes, models of physical fields.

Поставлена задача разработки компьютерной технологической платформы (КТП), позволяющей облегчить процесс создания расчетных методик и программного обеспечения САПР электротехнических устройств различной конструкции, в частности электрических машин и аппаратов (ЭМА). Функционирование данных устройств в большинстве случаев основано на индукционном принципе действия. Поэтому их расчетные методики строятся, как правило, на одинаковых положениях, что позволяет унифицировать процесс разработки как самих методик (даже в случае нетиповых исполнений проектируемых устройств), так и программных средств для их компьютерной реализации.

Данная унификация стала возможной вследствие использования в качестве математического ядра двух библиотек:

- 1) библиотека моделирования физических полей EMLib;
- 2) библиотека моделирования электрических цепей ECLib.

С помощью библиотеки EMLib, в частности, решаются задачи расчета магнитных полей с учетом распределенности в пространстве магнитного потока и с учетом особенностей конструкции устройства (рис. 1). Эти же задачи, а также тепловой расчет с учетом особенностей системы охлаждения могут быть решены с использованием электрических схем замещения, формируемых и рассчитываемых с помощью библиотеки ECLib. Комбинация цепных и полевых моделей позволяет решить задачи имитации произвольных режимов работы проектируемых устройств.

Для построения полевых и цепных моделей используются соответствующие параметрические модельные генераторы, представляющие собой программные коды, генерирующие полевые и цепные модели

проектируемых устройств по заданному алгоритму, а также реализующие серии расчетов физических поля и цепей.

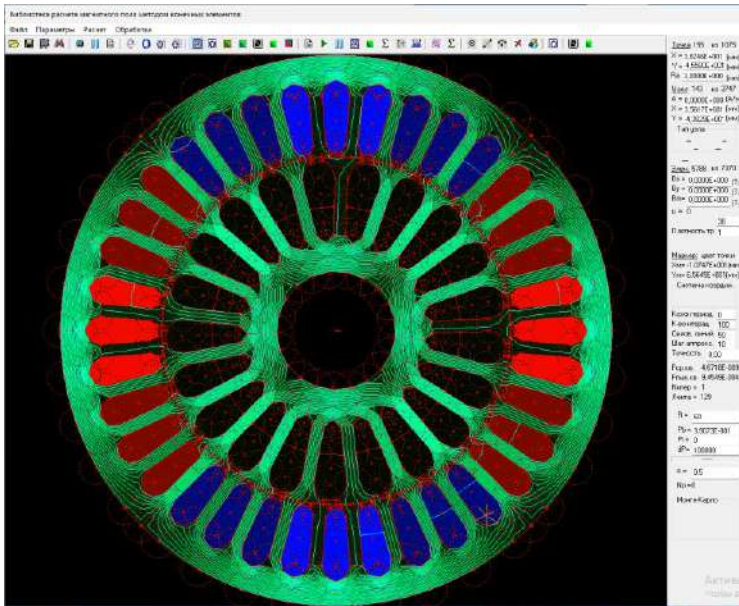


Рис. 1. Конечно-элементная модель асинхронной машины

Для создания управляющей подсистемы САПР используется процессор MSExcel, имеющий как табличный интерфейс для ввода/вывода данных, так и встроенную систему программирования VBA, позволяющую модифицировать данный функционал под любую прикладную задачу и подключить внешние функции, написанные в других системах программирования.

В настоящее время в рамках разрабатываемой платформы созданы расчетные подсистемы САПР трансформаторов малой мощности и САПР асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД КЗ). Расчетные подсистемы оформлены в виде рабочих книг, в которых помимо элементов управления расчетным процессом предусмотрен также типовой функционал справочной подсистемы САПР, подсистемы архивирования проектов, подсистемы параметрической генерации цепных и полевых моделей и т.п.

Расчетные модули САПР написаны на языке Python, имеющий библиотеку математических функций, не уступающую библиотеке MatLab.

Например, с ее помощью В САПР реализуется оптимизация проекта с использованием генетического алгоритма.

Разработано приложение, позволяющее формировать иерархическую структуру расчетных моделей на языке Python с использованием программной оболочки Spider. В частности, на рис. 2 приведены основные структурные блоки расчетной подсистемы САПР АД.

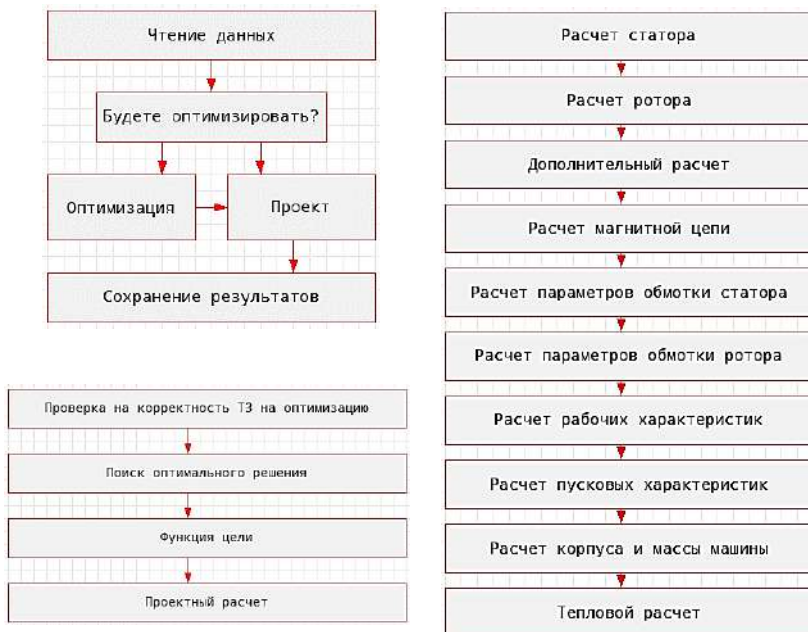


Рис. 2. Основные блоки расчетной подсистемы САПР АД КЗ

Использована методика, изложенная в пособии Копылова И.П. [1], доработанная путем внедрения в расчет полевых и цепных моделей. Расчетная подсистема позволяет рассчитывать АД как в пакетном режиме с обращением к справочной системе, в том числе в режиме поиска оптимального решения, так и в интерактивном режиме.

Литература

1. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2011. 767 с.

УДК 621.314

Е.Р. СОЛОВЬЕВ, аспирант,
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор,

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: s.er-k@mail.ru, aitispu@mail.ru

Имитационное моделирование трансформатора с несколькими магнитопроводами

Аннотация. В статье описан вариант доработки имитационной модели трансформатора тока для моделирования трансформаторов с несколькими магнитопроводами. В статье освещается проблема расчета трансформатора с сердечником из двух тороидальных магнитопроводами с разными магнитными характеристиками.

Ключевые слова: трансформатор тока, имитационная модель, гистерезис, аморфные сплавы, тороидальный магнитопровод.

E.R. SOLOVYEV, postgraduate,
A.I. TIKHONOV, Doctor of Engineering,

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: s.er-k@mail.ru, aitispu@mail.ru

Simulation of a transformer with multiple magnetic cores

Abstract. The article describes a variant of modification of the simulation model of a current transformer for modeling transformers with several magnetic cores. The paper covers the problem of calculation of the transformer with a core of two toroidal magnetic circuits with different magnetic characteristics.

Key words: current transformer, simulation model, hysteresis, amorphous alloys, toroidal magnetic circuit.

Измерительные трансформаторы тока, устойчивые к воздействию постоянной составляющей в цепи переменного тока, зачастую состоят из двух тороидальных магнитопроводов. Один с высокой магнитной проницаемостью, что повышает точность измерений в заданном диапазоне токов. Цель второго сердечника - предотвращение насыщения несинусоидальными составляющими переменного тока за счет низкой магнитной проницаемости (4000-25000).

Витые сердечники силовых трансформаторов набираются из нескольких тороидальных магнитопроводов, которые могут иметь разные магнитные характеристики из-за неидеальности процесса производства.

Поэтому имитационная модель трансформатора должна учитывать влияние каждого из магнитопроводов на работу изделия.

Предложенная авторами модель изображена на рис. 1. При разработке был использован пакет Simulink в ПО MATLAB. Данная имитаци-

онная модель является доработкой модели измерительного трансформатора тока[1].

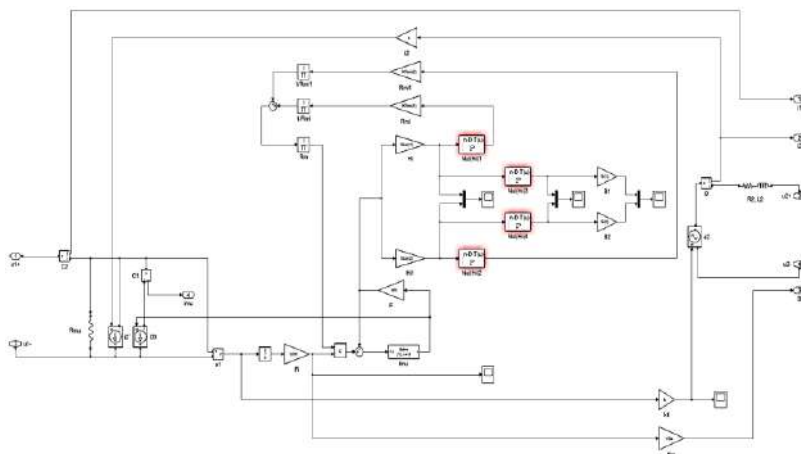


Рис. 1. Имитационная модель трансформатора с двумя магнитопроводами

Расчет основан на сравнении магнитодвижущей силы (МДС), от тока первичной обмотки, с магнитодвижущей силой, определенной с помощью кривых магнитной проницаемости магнитопроводов. Сравнение выполняется блоком «Solve».

Входные величины для расчета для каждого магнитопровода:

- напряженность магнитного поля,
- магнитные проницаемости, соответствующие нужному значению тока в первичной обмотке,
- магнитное сопротивление.

В случае, если магнитопроводы имеют разную длину средней магнитной линии и площадь поперечного сечения, то напряженности магнитного поля каждого магнитопровода также не будут равны. Соответственно, они по-разному влияют на работу устройства в целом.

По полученным напряженностям определены магнитные проницаемости магнитопроводов и построены кривые $1/\mu$.

С помощью магнитной проницаемости, соответствующей конкретной напряженности магнитного поля и, следовательно, току, определены магнитные сопротивления суммарное и каждого магнитопровода по отдельности.

Выводы и заключение

Разработан первый этап создания имитационной модели для расчета трансформаторов с несколькими магнитопроводами. Поняты принципы физических процессов, протекающих в разных сердечниках с общей обмоткой. Намечены этапы доработки схемы для расчета трансформаторов

с витыми сердечниками, например, при производстве и ремонте силовых распределительных трансформаторов с магнитопроводами из разных партий. В качестве новой задачи выбрано создание параметризованного генератора цепной модели для ускорения построения схем при изготовлении устройств и решениях полевых задач.

Литература

1. Соловьев, Е.Р. Разработка имитационной модели для проектирования измерительного трансформатора тока / Е. Р. Соловьев // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: технологии, инновации, достижения: Сборник научных статей по материалам XV Международной научно-практической конференции, Уфа, 24 мая 2024 года. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2024. С. 42-48. EDN HWINMJ.
2. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебник для вузов по спец. «Кибернетика электр. систем». Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1984. 439 с.
3. Тихонов А.И. Основы теории подобия и моделирования: учеб. пособие / 2-е изд. доп. и перераб. / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2016. 116 с.
4. Олсон Г. Динамические аналогии / Пер. с англ. Б.Л. Коробочкина под ред. М.А. Айзермана. – М.: Гос. изд-во иностранной литературы, 1944. 223 с.
5. Костюченко Р.Ю. Аналогии в науке и обучении. Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий, № 4(24), 2017. С. 136–140.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

УДК 621.313

^{1,2}А.И. ТИХОНОВ, д.т.н., профессор

²М.В. ИСАЕВА, соискатель

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1
E-mail: aitispu@mail.ru¹, marina.serzhantova@gmail.com²

Использование нейронных сетей при построении имитационной модели машины постоянного тока

Аннотация. Разработана имитационная модель машины постоянного тока, в которой использованы нейронные сети, обученные на результатах серии расчетов магнитного поля.

Ключевые слова: нейронные сети, имитационные модели, динамические режимы машин постоянного тока.

^{1,2}A.I. TIKHONOV, Doctor of Technical Sciences, Professor

²M.V. ISAEVA, applicant

¹Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

²National Research Technological University "MISIS"

119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, building 1

E-mail: aitispu@mail.ru¹, marina.serzhantova@gmail.com²

Using neural networks in constructing a simulation model of a DC machine

Abstract. A simulation model of a DC machine has been developed, which uses neural networks trained on the results of a series of magnetic field calculations.

Key words: neural networks, simulation models, dynamic modes of DC machines.

В [1, 2] рассмотрен принцип построения имитационной модели машины постоянного тока (МПТ) в среде MatLab Simulink с использованием библиотеки моделирования электрических цепей SimPowerSystems. Модель строится на основе системы уравнений

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{i\} \\ \alpha \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [L] & \{C\} & \{0\} \\ [0] & 1 & 0 \\ [0] & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{Bmatrix} \{u\} \\ \omega \\ M - M_B \\ J \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [R] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{i\} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \right)$$

где $\{i\}$ – вектор мгновенных токов; $\{u\}$ – вектор мгновенных напряжений; $[L]$ – квадратная матрица индуктивностей, рассчитываемая по формуле

$$L_{kj}(\{i\}) = \frac{\partial \Psi_k(\{i\})}{\partial i_j} \approx \frac{\Delta \Psi_k(\{i\})}{\Delta i_j};$$

$\{C\}$ – вектор ЭДС вращения, рассчитываемы по формуле

$$C_k(\{i\}) = \frac{\partial \Psi_k(\{i\})}{\partial \alpha} \approx \frac{\Delta \Psi_k(\{i\})}{\Delta \alpha}.$$

Каждый элемент матриц $[L]$ и $\{C\}$ представляет собой табличную зависимость, которая аппроксимируется многомерными сплайнами.

Данный метод предполагает проведение серии расчетов магнитного поля при изменении независимых аргументов в заданных пределах с заданным шагом, то есть по сетке, в узлах которой заданы значения аргументов. При этом, если при наличии k аргументов по каждому аргументу (по каждой оси расчетной сетки) заданы n значений, то количество расчетов поля, которые необходимы для формирования табличных зависимостей $L_{kj}(\{i\})$ и $C_k(\{i\})$ составляет $N = n^k$. С ростом количества аргументов вступает в силу «проклятие размерности».

Так, при $k=2$ (в качестве аргументов использованы ток обмотки возбуждения i_f и ток обмотки якоря i_a) и $n=20$ получаем $N = 400$, на что требуется около 50 мин расчетного времени (около 5 сек на один расчет поля). Но уже при моделировании машин без скоса пазов, где k числу аргументов добавляется угол поворота ротора α , получаем $k=3$,

$N=20^3=8000$, на что требуется уже около 11 часов расчетного времени. Уже здесь требуется уменьшать n . При этом из рассмотрения выпадает влияние некоторых особенностей конструкции машины. При $k=4$ и $k=5$ такой подход к моделированию становится практически неприменимым.

В своей работе для представления зависимостей $L_{kj}(\{i\})$ и $C_k(\{i\})$ мы использовали не многомерные сплайны, а нейронные сети, обученные на нерегулярной серии расчетов магнитного поля. В частности, были использованы сети обратного распространения с прямой связью, предоставляемые библиотекой MatLab DeepLearning. Структура нейронных сетей показана на рис. 1. Каждая сеть содержит по два слоя с 64 нейронами с логистическими функциями активации и по одному слою с одним нейроном с линейной функцией активации. Для обучения нейронных сетей использовалась функция `trainlm`, обеспечивающая обратное распространение в соответствии с оптимизацией Левенберга-Марквардта.

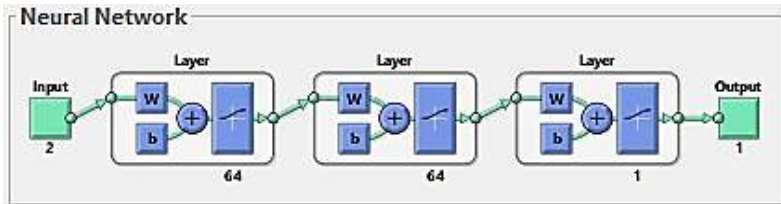


Рис. 1. Структура нейронной сети, обученной на серии расчетов поля

На рис. 2 приведена табличная зависимость индуктивности обмотки возбуждения МПТ от тока возбуждения и тока якоря и результаты ее аппроксимации нейронной сетью.

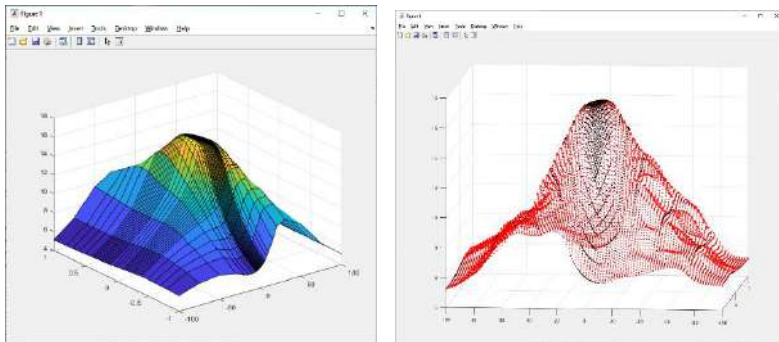


Рис. 2. Вид табличных зависимостей ($L_{ij}(i_f, i_a)$ и $M(i_f, i_a)$), полученных на серии расчетов магнитного поля машины постоянного тока с параллельным возбуждением

Имитационная модель МПТ с использованием нейронной сети для вычисления коэффициентов нелинейной матрицы [L] приведена на рис. 3.

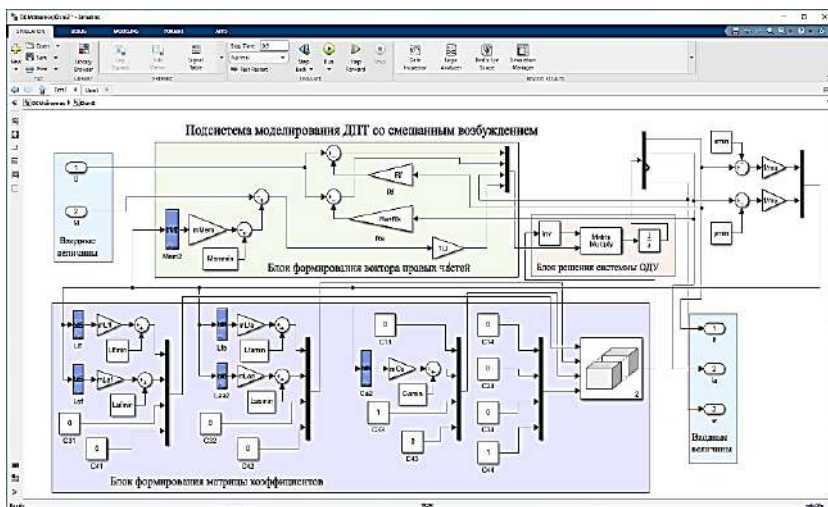


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели МПТ, построенной с использованием нейронных сетей

Результаты расчета имитационной модели не отличаются от результатов, полученных на сплайнах. При этом серия расчетов поля минимизируется за счет отказа от регулярности расчетной сетки при сохранении точности.

Литература

1. Тамьярова М.В. Повышение эффективности автоматизированного проектирования коллекторных электрических машин на основе параметрически генерируемых моделей магнитного поля; дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н., специальность 05.13.12 - Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика), Иваново, ИГЭУ, 2019 г. 129 с.
2. Тихонов А.И., Тамьярова М.В. Проектирование коллекторных машин на основе параметрически генерируемых моделей магнитного поля: Монография / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2020. 96 с.

УДК 621.313

А.А. БЕДЕКЕР, исполнительный директор,
А.В. ЗАХАРОВ, д.т.н., руководитель направления расчетов

ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром»
143005, г. Москва, территория Инновационного центра Сколково, ул. Нобеля д.7.
E-mail: av.zakharov@ruselprom.ru, bedeker.anton@yandex.ru.

О выборе соотношений чисел пазов ротора и статора новой линейки асинхронных электродвигателей модульной конструкции серии DAZO

Аннотация. В работе приведен алгоритм выбора соотношения пазов статора и ротора и методика оценки полученного результата, используемые при разработке активных частей асинхронных двигателей модульной конструкции. Разработанный алгоритм применен при проектировании электродвигателей серии DAZO. Алгоритм направлен на снижение технологической оснастки при производстве электродвигателей на основе унификации сердечников статора и ротора. Критерий выбора соотношения пазов основан на оценке добавочных потерь и добавочных моментов и виброшумовых характеристик.

Ключевые слова: Асинхронные двигатели, соотношения пазов статора и ротора, магнитные потери.

А.А. BEDEKER, Executive Director,
А.В. ZAKHAROV, Doctor of Technical Sciences, Head of the Calculations Department

Ruselprom Engineering Center LLC
143005, Moscow, the territory of the Skolkovo Innovation Center, 7 Nobel St.
E-mail: av.zakharov@ruselprom.ru, bedeker.anton@yandex.ru.

On the choice of the ratio of the rotor and stator slots of the new line of induction motors of the modular design of the DAZO series

Abstract. The paper presents an algorithm for selecting the ratio of the stator and rotor slots and a method for evaluating the result obtained, used in the development of active parts of induction motors of modular design. The developed algorithm is used in the design of electric motors of the DAZO series. The algorithm is aimed at reducing the technological equipment in the production of electric motors based on the unification of the stator and rotor cores. The selection criteria are based on the assessment of additional losses and additional torque and noise.

Key words: Induction motors, stator and rotor slot ratios, magnetic losses.

Импортозамещение высоковольтных асинхронных двигателей - одна из актуальных практических задач отечественного электромашиностроения. Спрос на электрические машины имеющие увязку мощности к габариту зарубежных производителей [1, 2] высок, а предложения ограничены. При этом задача создания двигателей с указанными особенностями может быть решена на основе двух подходов: копирование удачных зарубежных образцов; разработка отечественной серии с

характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам. Разработка отечественной серии высоковольтных двигателей представляет актуальную научно-практическую задачу. Решению указанной глобальной задачи, посвящены работы [3, 4], проводимые Российским электротехническим концерном «Русэлпром» с 2021 г. Настоящая статья рассматривает задачу выбора соотношения пазов ротора и статора в рамках разработки серии DAZO, разработка которой направлена на решение глобальной задачи импортозамещения высоковольтных асинхронных двигателей.

Выбор соотношения пазов статора и ротора в условиях унификации пазово-вырубных штампов – задача, требующая алгоритмизации решения. В настоящей работе решение проводилось по следующей схеме:

- формирование предварительных вариантов на основе поисковых расчетов;
- моделирование на основе метода конечных элементов;
- предварительный отбор на основе анализа добавочных потерь и добавочных моментов;
- анализ виброшумовых характеристик;
- окончательный отбор.

Рассмотренные варианты соотношений зубцов сведены в табл. 1.

Таблица 1. Рассмотренные соотношения зубцов статора и ротора

2р	Z_1	Z_2	Примечание
4	48	38	Повышенные пульсационные потери
	60	50	
	72	62	
6	72	58	
		86	Повышенные пульсационные потери
8	72	58	
		86	Повышенные пульсационные потери
10	72	52	Повышенный шум
		54	Повышенные добавочные моменты
		68	
	90	68	
		72	
12	72	64	
	90	68	

* *примечание:* зачеркнутым шрифтом показаны отброшенные в результате анализа соотношения.

На рис. 1, рис. 2 приведены результаты моделирования методом конечных элементов электродвигателей с соотношением пазов $Z_1/Z_2=72/54$ и $Z_1/Z_2=72/68$.

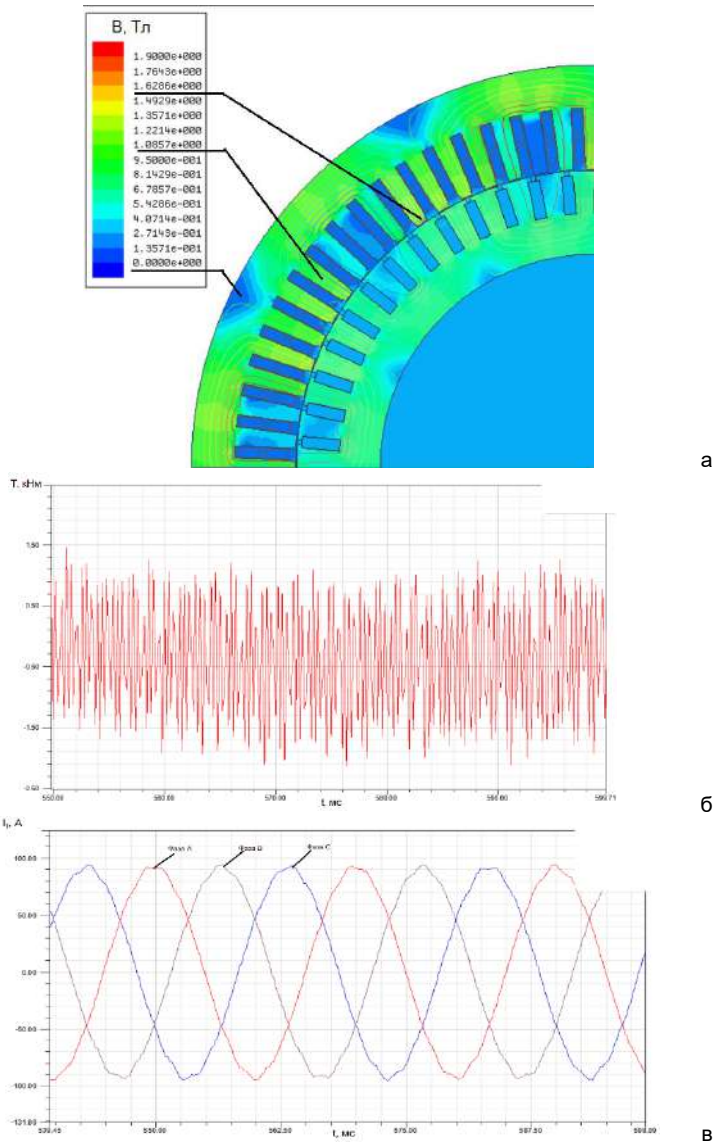


Рис. 1. Результаты моделирования электродвигателя с соотношением $z_1/z_2=72/54$ (а – картина поля; б – временная диаграмма электромагнитного момента на холостом ходу; в – временная диаграмма тока на холостом ходу)

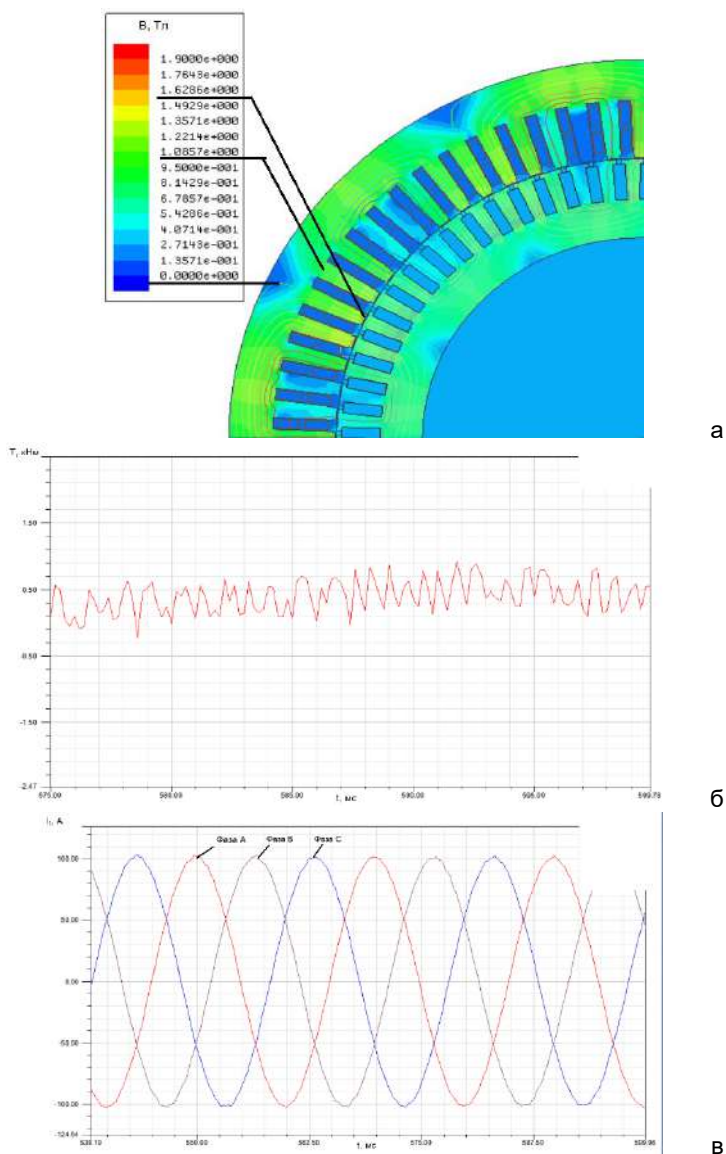


Рис. 2. Результаты моделирования электродвигателя с соотношением $z_1/z_2=72/68$ (а – картина поля; б – временная диаграмма электромагнитного момента на холостом ходу; в – временная диаграмма тока на холостом ходу)

Результаты, приведенные на рис. 1, рис. 2 показывают типичные характеристики, указывающие на возможное возникновение добавочных моментов и повышенного шума в электродвигателях для соотношения $z_1/z_2=72/54$, которое подтверждается на основе расчета виброшумовых характеристик по методике ВНИИЭМ [5]. Результаты анализа магнитных шумов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения уровня звукового давления от магнитного поля для электродвигателей $2p=10$

z_1/z_2	72/52	72/54	72/68	90/68	90/72
L, дБА	109	120	117	81	91

Основные выводы.

1. Актуальность разработки высоковольтных асинхронных двигателей модульной конструкции, соответствующих по установочно-присоединительным размерам зарубежным аналогам, подтверждается спросом на указанные машины.

2. Успешное освоение производством современных высоковольтных электродвигателей должно быть обеспечено как изменением технологического уклада промышленности и совершенствованием конструкции машин, так и разработкой сердечников, характеризующихся высокими энергетическими показателями. При этом выбор соотношения пазов статора и ротора является одной из ключевых задач.

3. Наиболее целесообразно использовать комбинированный подход к выбору соотношений пазов статора и ротора, основанный на использовании моделирования магнитных полей и аналитических методик.

Литература

1. High voltage configured to order motors / Technical catalog ABB, 2022.
2. Siemens High voltage three-phase induction motors / Catalog D 84.9, 2019.
3. Zakharov A., Bedeker A., Zuev A., Safronenkov Yu., Kashcenkov A. Analysis of method to increase the energy efficiency of squirrel cage induction motor of 200-1000kW / 2021 International Conference on Electrotechnical Complex and System (ICOECS). DOI:10.1109/ICOECS52783.2021.9657366
4. Бедер А.А., Захаров А.В., Кащенко А.В., Кудряшов С.В. Концепция и основные результаты разработки асинхронных двигателей с выемным сердечником // Электротехника, 2025, №2. С2-11.
5. Воронкин В.А., Геча В.Я., Городецкий Э.А., Евланов В.В., Захаренко А.Б., Зубренков Б.И., Каплин А.И., Ледовской В.И., Скларова И.В., Смирнова Л.П., Шапиро М.Х. Методы проектирования малошумных электрических машин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Том 103. – 2006.

УДК 621.313.33

А.С. КОБЕЛЕВ, к.т.н., начальник расчетного отдела

Концерн «РУСЭЛПРОМ», представительство в г. Владимир
600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1
E mail: a.kobelev@ruselprom.ru

К вопросу о соотношении главных размеров высокоэнергетически эффективных асинхронных двигателей

Аннотация. Выполнен поиск оптимальных вариантов энергоэффективных асинхронных машин внутри рациональных диапазонов изменения главных размеров. Проанализирована возможность получения ближайшей старшей мощности в активном объеме, достаточном для обеспечения старшего класса энергоэффективности.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, оптимизация, энергоэффективность.

A.S. KOBELLEV, Cand. of Technical Sciences,
head of the theoretical Department

Ruselprom Engineering Center LLC
600009, Vladimir, Elektrozavodskaya street, 1
E mail: a.kobelev@ruselprom.ru

On the issue of the ratio of the main dimensions of highly energy-efficient induction motors

Abstract. The search for optimal variants of energy-efficient induction machines within rational ranges of change of the main sizes carried out. The possibility of obtaining the nearest higher power in the active volume, sufficient to ensure a higher energy efficiency class, is analyzed.

Key words: induction motor, optimization, energy efficiency.

Уточнение рациональных соотношений главных размеров асинхронных двигателей (АЭД), а также поиск наиболее эффективных вариантов в пространстве допустимых ограничений является актуальной задачей. Ее решение позволяет определить минимальные вес, объем, стоимость активных материалов для заданных электромеханических показателей, а также выбрать лучший вариант унификации при сложившемся технологическом укладе (например, выбор между унификацией $2p=4$ и $2p=6$ либо $2p=6$ и $2p=8$).

Рациональные соотношения между главными размерами АЭД исследуются достаточно давно [1]. Однако консолидированная позиция среди исследователей достигнута лишь в части отношения между внутренним D_{is} и внешним D_{as} диаметром сердечника статора, хотя полного единомыслия нет и здесь, см. табл. 1. Значительно менее устоялся подход определению рационального отношения $\lambda = Ls/\tau$ или

$\lambda' = Ls / D_{IS}$. В русле обсуждаемой темы необходимо упомянуть отношение bzs/tzs , для которого классиками электромеханики так же определены рациональные границы. Заметим, что для высокоэнергетически эффективных двигателей такие исследования ранее не выполнялись. Поиск наиболее эффективных решений в пространстве, формируемом рациональными интервалами D_{IS} , D_{aS} , Ls , bzs/tzs для $2p=4$ выполнен автором в [2]. В данном докладе проведем анализ для $H=180$ мм, $2p=6$, поскольку рациональные отношения λ зависят от $2p$.

Поставим задачу получить класс энергоэффективности (ЭЭФ) IE2 в активном объеме $V_{act}=14$ дм³, близком к V_{act} серий 5A, 7AVER при IE1.

Таблица 1. Соотнесение главных размеров для некоторых серий АД, $2p=6$

H , мм	P_n , кВт	Серия, фирма	D_{IS} , мм	D_{aS} , мм	Ls , мм	V_{act} , дм ³	D_{IS}/D_{aS}	IE
180	18,5	4A	220	313	145	11,16	0,703	IE0
		5A	209,7	295	195	13,33	0,711	IE1
		7AVER	209,7	295	195	13,33	0,711	IE1
		ELDIN	185	273	208	12,18	0,678	IE1
Cen200	18,5	ABB	235	323	н/д		0,728	
Cen200		EU	200	300	230	16,26	0,667	IE1
		Принят в расчетах				14,0		

Вторую группу расчетов проведем с целью реализации класса ЭЭФ IE3. С учетом данных табл. 2 и классического утверждения о пропорциональности потерь весу или объему АД, для второй группы расчетов примем $V_{actIE3+1}=1,2V_{actIE2}$. Дополнительно в объеме $V_{actIE3+1}$ получим ближайшую старшую мощность $P_{n+1}=22$ кВт=1,19 · P_n .

Таблица 2. Относительные потери для разных классов ЭЭФ, $2p=6$

P_n , кВт	IE1	IE2	IE3	IE4	$\Delta P_{IE1} / \Delta P_{IE2}$	$\Delta P_{IE2} / \Delta P_{IE3}$	$\Delta P_{IE3} / \Delta P_{IE4}$
18,5	88,6	90,4	91,7	93,4	1,21	1,17	1,28

Наиболее значимые результаты расчетов представлены в табл. 3. На рисунке представлена важная для проектных расчетов зависимость стоимости активных материалов C_{act} от параметра λ при различных соотношениях главных размеров для двух классов энергоэффективности.

Таблица 3. Показатели АЭД 180–6 при изменении главных размеров

Типоразмер	P_n кВт	IE	Fe	η %	P_{Cu} Вт	Pal Вт	P_{Fe} Вт	Q_{out} °C	Ls/t	G_{oil} кг	G_{act} кг	C_{act} о.е.
DaSDiSTN–M 14	18,5	2	2212	90,5	801	420	471	61,2	2,35	12,1	89,8	28,7
DaSDiSTW–M 16	18,5	2	2212	90,4	829	427	439	61,6	2,35	13,3	87,7	30,4
DaSDiSTN–M 18	18,5	3	2216	91,4	718	396	371	49,2	2,82	13,2	106	34,3
DaSDiSTW–M 21	18,5	3	2212	91,4	667	378	448	48,9	2,82	15,6	105	35,8
DaSDiSTW–M 22	18,5	3	2216	91,7	681	379	356	47,0	2,82	15,2	104	36,9
DaSDiSTW–L 21a	22,0	2	2212	90,9	904	502	518	64,5	2,82	15,2	104	35,4
DaSDiMTN–M 23	18,5	2	2212	90,4	860	404	451	62,7	2,27	11,8	89,0	28,5
DaSDiMTW–M 25	18,5	2	2212	90,4	880	366	462	62,7	2,27	12,3	86,6	29,2
DaSDiMTN–M 27	18,5	3	2216	91,4	739	379	361	49,3	2,72	13,2	105	34,6
DaSDiMTW–M 31	18,5	3	2216	91,7	702	348	360	46,9	2,72	14,9	104	36,9
DaSDiLTN–M 32	18,5	2	2212	89,6	1104	385	413	71,3	2,19	9,6	88,3	26,0
DaSDiLTW–M 34	18,5	2	2212	90,4	926	328	446	62,9	2,19	11,7	86,7	28,7
DaSDiLTN–M 36	18,5	3	2216	90,8	920	331	346	54,5	2,63	10,4	104	31,5
DaSDiLTW–M 40	18,5	3	2216	91,7	771	283	358	47,7	2,63	12,8	102	34,4
DaMDiSTN–M 41	18,5	2	2212	90,4	873	400	441	66,7	1,97	11,7	90,0	28,3
DaMDiSTW–M 43	18,5	2	2212	90,4	883	375	481	66,8	1,97	12,8	86,8	29,8
DaMDiSTN–M 44	18,5	3	2212	91,5	654	370	445	50,9	2,36	14,8	108	34,7
DaMDiSTN–M 45	18,5	3	2216	91,7	681	370	353	49,5	2,36	14,0	108	35,4
DaMDiSTW–M 48	18,5	3	2212	91,7	607	346	456	48,5	2,36	17,6	106	38,2
DaMDiSTW–M 49	18,5	3	2216	91,7	695	348	361	49,6	2,36	15,3	104	37,1
DaMDiMTN–M 50	18,5	2	2212	90,5	891	386	415	66,2	1,90	11,4	91,1	28,0
DaMDiMTW–M 52	18,5	2	2212	90,4	947	334	427	67,5	1,90	11,5	87,3	28,3
DaMDiMTN–M 54	18,5	3	2216	91,5	756	361	332	51,8	2,28	12,8	108	34,0
DaMDiMTW–M 58	18,5	3	2216	91,7	761	308	339	50,6	2,28	13,4	104	35,0
DaMDiLTN–M 59	18,5	2	2212	89,8	1094	359	386	73,8	1,83	9,1	90,7	25,5
DaMDiLTW–M 61	18,5	2	2212	90,4	1009	303	394	68,3	1,83	10,9	87,4	27,9
DaMDiLTN–M 63	18,5	3	2216	91,0	919	331	310	57,1	2,20	10,2	108	31,2
DaMDiLTN–L 63a	22,0	2	2216	90,9	1143	407	368	70,3	2,20	10,4	108	31,2
DaMDiLTW–M 67	18,5	3	2216	91,7	814	276	313	51,2	2,20	12,5	104	35,0
DaLDiSTN–M 68	18,5	2	2212	90,5	886	386	424	68,8	1,65	11,1	92,6	27,6
DaLDiSTW–M 70	18,5	2	2212	90,5	916	355	427	69,3	1,65	12,4	88,7	29,3
DaLDiSTN–M 72	18,5	3	2216	91,7	724	356	338	52,4	1,97	12,6	110	33,7
DaLDiSTW–M 76	18,5	3	2216	91,7	750	330	336	52,7	1,97	14,2	105	35,8
DaLDiMTN–M 77	18,5	2	2212	90,5	915	377	404	69,2	1,59	10,8	93,3	27,3
DaLDiMTW–M 79	18,5	2	2212	90,5	946	309	435	69,4	1,59	11,9	88,1	28,8
DaLDiMTN–M 81	18,5	3	2216	91,8	727	350	323	51,9	1,83	12,7	111	33,8
DaLDiMTW–M 84	18,5	3	2212	91,7	691	305	412	51,4	1,83	15,9	107	36,3
DaLDiMTW–M 85	18,5	3	2216	91,7	781	303	326	52,9	1,83	13,8	105	35,5
DaLDiLTN–M 86	18,5	2	2212	90,4	998	355	364	71,3	1,53	10,4	93,1	26,9
DaLDiLTW–M 88	18,5	2	2212	90,4	1016	295	401	71,3	1,53	11,1	88,6	28,0
DaLDiLTN–M 90	18,5	3	2216	91,5	834	310	305	54,9	1,83	11,2	110	32,2
DaLDiLTW–M 94	18,5	3	2216	91,7	822	271	317	53,5	1,83	12,6	105	34,3

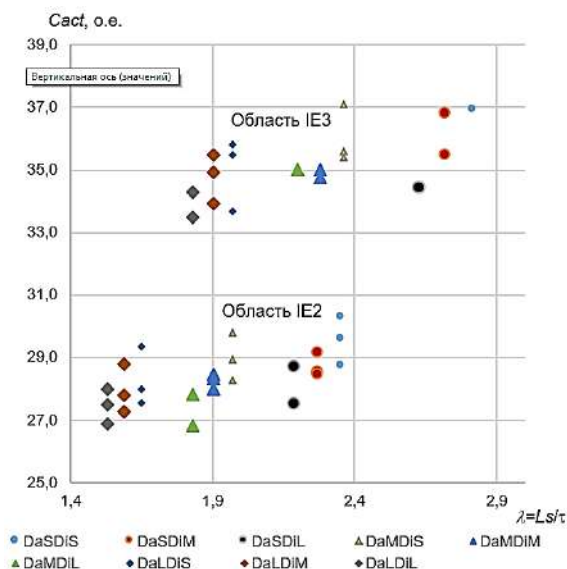


Рис. Зависимость $C_{act}=f(\lambda)$ при различных соотношениях главных размеров.

Основные выводы.

1. Если в фиксированном V_{act} ЭЭФ IE2 достигается без запаса по КПД, то увеличения V_{act} на величину $\Delta P_{IE2}/\Delta P_{IE3}$, недостаточно для обеспечения IE3. Дополнительно следует применить динамную сталь с меньшими удельными потерями.

2. Если ближайшая старшая мощность $P_{n+1} \approx P_n \cdot \Delta P_{IE2}/\Delta P_{IE3}$, то увеличения V_{act} на величину $\Delta P_{IE2}/\Delta P_{IE3}$, достаточно для обеспечения P_{n+1} .

3. Решение с более дорогой электротехнической сталью, имеющей меньшие удельные потери, может быть экономичнее в виду экономии обмоточной меди.

4. Наиболее экономичные варианты $2p=6$ получаются на максимальных заготовительных диаметрах. При этом решения с минимальным D_{IS} конкурентоспособны, что открывает возможность унификации $2p=4$ и $2p=6$ по сердечнику статора.

Литература

1. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. Л.: Энергия, 1968. 731 с.
2. Кобелев А.С. Максимизация электромеханических показателей асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в фиксированном объеме активных частей // Электротехника. 2025. № 3. С. 7–18.

УДК 621.313

В.П. ШИШКИН, к.т.н., профессор

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

E-mail: shishkin@emf.ispu.ru

Полезная энергия постоянного магнита

Аннотация. Рассмотрены условия получения максимальной полезной энергии постоянного магнита с линейной кривой размагничивания.

Ключевые слова: магнитная энергия, кривая размагничивания.

V.P. SHISHKIN, Ph.D., Professor

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

E-mail: shishkin@emf.ispu.ru

Useful energy of a permanent magnet

Abstract. The conditions for obtaining the maximum useful energy of a permanent magnet with a linear demagnetization curve are considered.

Key words: magnetic energy, demagnetization curve.

Одним из параметров, определяющих качество постоянного магнита, является удельная магнитная энергия, развиваемая единицей объема магнитного материала. Действие магнита наиболее эффективно в том случае, когда рабочая точка лежит в зоне, где магнитная энергия единицы объема магнитного материала достигает максимального значения.

Рассмотрим постоянный магнит с линейной кривой размагничивания (магниты на основе редкоземельных материалов, магнитотвердых ферритов), преимуществом которой является тот факт, что прямая возврата при любом способе стабилизации магнита лежит на этой характеристике.

Энергию магнитного поля, обусловленную потоком постоянного магнита Φ_m , можно разделить на полезную, обусловленную полезным магнитным потоком Φ_δ , и энергию рассеяния, обусловленную потоком рассеяния Φ_σ . Первая пропорциональна площади прямоугольника ABCD, а вторая – OCDK (рис. 1).

Уравнение линии размагничивания постоянного магнита в относительных единицах

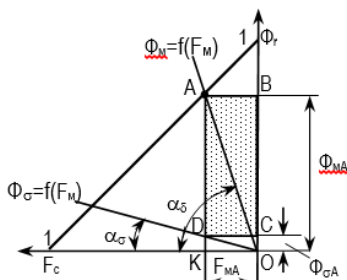


Рис.1. К определению полезной энергии постоянного магнита

$$F_M + \Phi_M = 1. \quad (1)$$

Уравнение линии потока магнита $\Phi_M = f(F_M)$ в случае ненасыщенной магнитной цепи в о.е.

$$\Phi_M = k_1 F_M, \quad (2)$$

где $k_1 = \operatorname{tg} \alpha_\delta$.

Уравнения линии потока рассеяния $\Phi_\sigma = f(F_M)$

$$\Phi_\sigma = k_2 F_M,$$

Где $k_2 = \operatorname{tg} \alpha_\sigma = k_1 (1 - 1/\sigma)$.

Решив уравнения (1) и (2), найдём координаты точки А:

$$F_{MA} = \frac{1}{1+k_1}; \quad \Phi_{MA} = \frac{1}{1+1/k_1} = \frac{k_1}{1+k_1}.$$

Площадь заштрихованного прямоугольника

$$S = F_{MA} (\Phi_{MA} - \Phi_{\sigma A}) = \frac{k_1}{\sigma(1+k_1)^2}$$

определяет полезную энергию постоянного магнита. Для нахождения максимального значения S , возьмем производную и приравняем её нулю

$$\frac{dS}{dk_1} = \frac{d}{dk_1} \frac{k_1(1+k_1)^{-2}}{\sigma} = 0.$$

После дифференцирования получаем значение оптимального коэффициента k_1

$$K_1 = 1/$$

и максимальное значение полезной энергии

$$S_{\max} = \frac{1}{4\sigma}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что для любой магнитной системы существует коэффициент рассеяния, соответствующий максимальной полезной энергии.

Чтобы магнит развивал максимальную энергию, необходимо, чтобы т. А лежала на пересечении луча магнитного потока магнита под углом

$$\alpha_\delta = \arctan(k_1) = \pi/4$$

и серединой линии размагничивания магнита.

Добиться такого положения можно двумя путями:

1) либо воздействуя на наклон линии потока магнита $\Phi_M = f(F_M)$, изменяя воздушный зазор;

2) либо воздействуя на наклон линии размагничивания постоянного магнита, изменяя площадь постоянного магнита (точка Φ_r) и высоту магнита (точка F_c).

Тогда координаты т. А (в абсолютных единицах) будут:

$$\Phi_M = 0,5\Phi_r = 0,5B_r b_M l_M, \text{ Вб}; \quad F_M = 0,5F_c = 0,5 \cdot 2h_M H_c, \text{ А}.$$

Значение F_M позволяет определить воздушный зазор, который при данной геометрии магнита обеспечивает максимум полезной энергии

$$\delta = h_M \frac{H_c \mu_0 \sigma}{B_r k_\delta k_\mu}, \text{ м}.$$

На рис. 2 приведена рабочая диаграмма магнита для двигателя мощностью 100 Вт при $n_1 = 3000$ об/мин и магните марки «28СА250», из которой следует оптимальный воздушный зазор

$$\delta = h_M \frac{H_c \mu_0 \sigma}{B_r k_\delta k_\mu} = 0,006 \frac{240000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,1}{0,4 \cdot 1,043 \cdot 1,118} = 0,0043, \text{ м},$$

а полезная энергия, создаваемая в воздушном зазоре единицей объема постоянного магнита, будет

$$w_M = \frac{\Phi_{\delta d} \cdot F_{Mд} \cdot F_c \cdot 0,001}{4S_M \cdot h_M} = \frac{0,00095 \cdot 0,41 \cdot 2880 \cdot 0,001}{4 \cdot 0,00435 \cdot 0,006} = 10,7, \text{ кДж / м}^3.$$

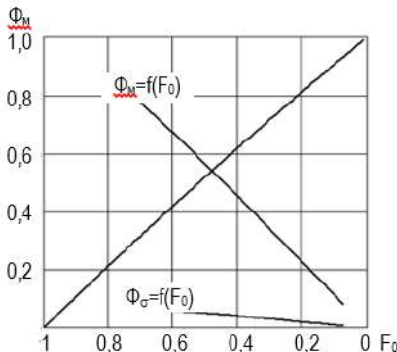


Рис. 2 Рабочая диаграмма магнита

Литература

1. Электрические машины с постоянными магнитами / В.А. Балагуров [и др.]. Энергия, 1964. 478 с..
2. Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности / Н.П. Ермолин. Высшая школа, 1967. 503 с.

УДК 621.313

Ю. Б. КАЗАКОВ, д.т.н., профессор

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

E-mail: elmash@em.ispu.ru

Повышение эффективности применения дробных зубцовых обмоток в трехфазных электрических машинах

Аннотация. Повышение эффективности трехфазных многополюсных электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками достигается путем совмещения схем звезды и треугольника.

Ключевые слова: трехфазные дробные зубцовые обмотки, совмещение схем звезды и треугольника, эффективность.

Yu.B. KAZAKOV, Doctor of Engineering, professor

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

e-mail: elmash@em.ispu.ru

Improving the efficiency of using fractional tooth windings in three-phase electric machines

Abstract. Increasing the efficiency of three-phase multi-pole electric machines with fractional tooth windings is achieved by combining star and delta circuits.

Key words: three-phase fractional tooth windings, combination of star and delta circuits, efficiency.

В многополюсных электродвигателях (ЭД) с числом полюсов $2p$ при ограниченном числе пазов сердечника якоря Z могут применяться дробные зубцовые обмотки (ДЗО) якоря с числом пазов на полюс и фазу $q < 1$, т.е. с дискретным и достаточно редким распределением фазных обмоток по пазам сердечника [1]. Шаг ДЗО u принимают близким полюсному делению τ . При $u = 1$ зубцовое деление Z выполняют минимально отличающимся от $2p$, но не равным $2p$, при этом Z кратно числу фаз ЭД. ДЗО технологичны в изготовлении, имеют минимальный вылет лобовых частей, что позволяет снизить осевой размер ЭД, расход меди, активное сопротивление и электрические потери в лобовых частях, индуктивность лобового рассеяния. ДЗО обладают повышенной надежностью, так как у них отсутствуют пересечения лобовых частей катушек разных фаз. Применение ДЗО перспективно при изготовлении ЭД повышенной удельной мощности и момента, в том числе обращенных ЭД для привода устройств с внешней вращающейся частью.

Различающееся по полюсам размещение ДЗО в пазах сердечника якоря приводит к отличающимся распределениям магнитодвижущих сил (МДС) под разными полюсами. Дискретное распределение ДЗО

приводит к отличию распределения МДС ДЗО от синусоидальной формы, присутствию неосновных низших и высших пространственных гармоник [2, 3] со значительными амплитудами МДС, которые вызывают повышенное дифференциальное рассеяние, пульсации электромагнитного момента, провалы в механической характеристике при пуске ЭД, увеличивают добавочные потери, уровни электромагнитного шума и вибраций.

Снижение амплитуд МДС не основных пространственных гармоник возможно при замене трехфазной 6-ти зонной ДЗО на трехфазную совмещённую 12-ти зонную ДЗО с увеличенным коэффициентом распределения k_p и обмоточный коэффициентом $k_{об}$. Трехфазная совмещённая ДЗО содержит две трехфазные ДЗО, соединенные одна по схеме «звезда» Y , другая по схеме «треугольник» D и с равными амплитудами МДС. Обмотки Y и D в ДЗО содержат по $Z/2$ катушек. Оси обмоток смещаются в пространстве на угол $\pi/6$. Сами обмотки соединяются параллельно или последовательно, совмещенная обмотка включается на одно трехфазное напряжение сети (рис. 1) с выполнением требований совместной работы обмоток [4]. Токи фаз обмоток I_D и I_Y сдвинуты на $\pi/6$ периода. По электромагнитным свойствам такая совмещенная обмотка аналогична шестифазной 12-ти зонной обмотке. Ранее реализация трехфазной совмещенной ДЗО не рассматривалась [5, 6].

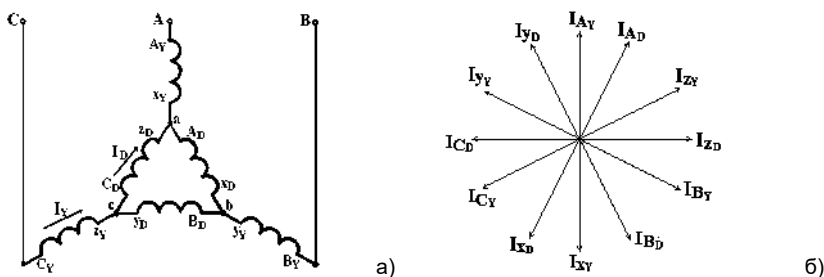


Рис. 1. Трехфазная совмещенная ДЗО с последовательным соединением Y и D (а), токи в фазах (б)

Выполнение симметричной трехфазной совмещенной ДЗО возможно не при всех q . Корректное совмещение обмоток Y и D в ДЗО возможно лишь при определенных сочетаниях p и Z .

Пространственный угол сдвига осей катушек в машине $\gamma = \frac{2\pi p}{Z} = \frac{2\pi p}{2pmq} = \frac{\pi}{mq}$ для симметричной совмещенной ДЗО должен отличаться от угла 0° или π (180°) на угол между осями катушек равный $\alpha = 2\pi/(4m) = \pi/(2m)$ – размеру фазной зоны, что позволяет сформировать 12-ти зонную обмотку. Поэтому для выполнения симметричной трехфазной совмещенной ДЗО необходимо выполнение условия

$\gamma = \frac{\pi}{mq} = \pi \pm \frac{\pi}{2m}$, что определяет $q = \frac{2}{2m \pm 1}$ и дает значение

$\tau = m q = \frac{2m}{2m \pm 1} \approx 1$, близкое шагу ДЗО $y = 1$. Так для $m = 3$ должно выполняться $\gamma = \pi - \frac{\pi}{2m} = 5\pi/6$ или $\gamma = \pi + \frac{\pi}{2m} = 7\pi/6$. Это возможно для $q = 2/5$ и $\tau = m q = Z/2p = 6/5$ или $q = 2/7$ и $\tau = 6/7$. Тогда $Z = 2p m q = 12p/5$ или $Z = 12p/7$, при Z и p – целых числах, Z кратным $m = 3$. Так для $q = 2/5$ и $Z/2p = 6/5$ симметричная трехфазная совмещенная ДЗО $Y+D$ возможна при p , кратном 5; для $q = 2/7$ и $Z/2p = 6/7$ – при p , кратном 7, например: при $Z = 12$ и $p = 5$, или при $Z = 24$ и $p = 10$, или при $Z = 12$ и $p = 7$, или при $Z = 24$ и $p = 14$.

На рис. 2 представлена симметричная совмещенная ДЗО трехфазного ЭД для $2p = 10$, $Z = 12$, $y = 1$, $q = 2/5$ с последовательным соединением $Y+D$.

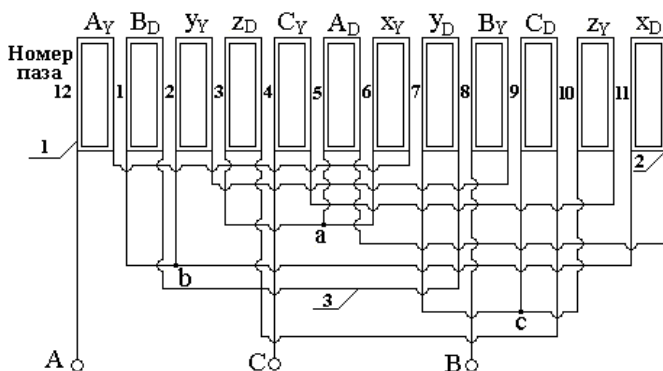


Рис. 2. Трехфазная совмещенная ДЗО с последовательным соединением $Y+D$ для $2p = 10$, $Z = 12$, $q = 2/5$: 1 – катушки Y ; 2 – катушки D ; 3 – межкатушечные соединения

Таким образом показана возможность выполнения симметричных трехфазных совмещенных звезда-треугольник дробных зубцовых обмоток при определенных соотношениях чисел пазов и полюсов - число пазов на полюс должно составлять $6/5$, а число пар полюсов быть кратным 5, или число пазов на полюс должно составлять $6/7$, а число пар полюсов быть кратным 7. По электромагнитным свойствам такая обмотка аналогична шестифазной обмотке. Обмоточный коэффициент трехфазных совмещенных дробных зубцовых обмоток достигает 0,9659258 и на 3,52 % выше, чем для несовмещенных обмоток.

Литература

1. Шевченко А.Ф. Многополюсные синхронные машины с дробным зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов // Электротехника. № 9, 2007. С. 3-8.

2. Бабицкий Д.Ю., Топорков Д.М., Приступ А.Г., Темлякова З.С. Способы улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками // Электротехника. № 6, 2021. С. 31-36.

3. Бабицкий Д.Ю., Шевченко А.Ф. Об улучшении гармонического состава магнитодвижущей силы дробных зубцовых обмоток // Электротехника №5, 2023. С. 29-33.

4. Казаков Ю.Б., Смирнов Д.С., Киселев М.А., Новиков И.А., Захаров А.В. Утонченный анализ применения в трехфазных электродвигателях совмещенных обмоток звезда-треугольник // Электротехника. № 3, 2024. С. 2-12.

5. Патент на полезную модель RU № 231606 U1. Казаков Ю.Б. Трехфазная электрическая машина. Заявка 2024130268 от 07.10.2024 // БИ 2025. № 4.

6. Патент на полезную модель RU № 232701 U1. Казаков Ю.Б. Трехфазная электрическая машина. Заявка 2024137360 от 11.12.2024 // БИ 2025. № 8.

УДК 621.313.12

ПРАХТ В.А. к.т.н., вед. науч. сотрудник,
ДМИТРИЕВСКИЙ В.А. к.т.н., вед. науч. сотрудник,
КАЗАКБАЕВ В.М. к.т.н., ст. науч. сотрудник,
ПАРАМОНОВ А.С. мл. науч. сотрудник,
ВАЛЕЕВ Э.А. мл. науч. сотрудник.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620062 г. Екатеринбург, ул. Мира 19
E-mail: va.prakht@urfu.ru

Синхронная машина с разомкнутым магнитопроводом статора

Аннотация. Исследовано улучшение рабочих характеристик синхронной машины с сосредоточенными обмотками и постоянными магнитами (СМсСО-иПМ) при использовании разомкнутого магнитопровода статора. Сопоставление традиционной СМсСОиПМ и СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом для безредукторного ветрогенератора малой мощности (1784 Вт, 338 об/мин) выполнено с использованием методов конечных элементов и алгоритма оптимизации Нелдера-Мида.

Ключевые слова: электрические машины, синхронная машина с постоянными магнитами, математическое моделирование, ветрогенератор.

PRAKHT V.A. PhD, Leading Researcher,
DMITRIEVSKII V.A. PhD, Leading Researcher,
KAZAKBAEV V.M. PhD, Senior Researcher,
PARAMONOV A.S. Junior Researcher,
VALEEV E.A. Junior Researcher.

Ural Federal University,
620062 Yekaterinburg, 19 Mira street
E-mail: va.prakht@urfu.ru

Synchronous machine with segmented stator magnetic circuit

Abstract. The improvement of the performance of a concentrated winding permanent magnet synchronous machine (CWPMMSM) using a modular stator is investigated.

Comparison of traditional and modular CWPMSM designs for a low-power direct-driven wind turbine (1784 W, 338 rpm) is performed using finite element and Nelder-Mead methods.

Ключевые слова: electric machine, surface permanent magnet machine, mathematical modeling, wind generator.

Введение

Синхронные машины с сосредоточенными обмотками и постоянными магнитами (СМсСОиПМ) позволяют увеличить число полюсов без увеличения числа пазов статора, уменьшить длину лобовых частей, и в целом повысить компактность машины и удельный момент, по сравнению с машинами с распределенной обмоткой [1]. Увеличение числа полюсов особенно важно для низкоскоростных высокомоментных приложений типа ветрогенераторов с безредукторным приводом [2].

В то же время, по сравнению с традиционными синхронными машинами с постоянными магнитами с распределенной обмоткой, в СМсСОиПМ ухудшен гармонический состав кривых МДС статора и индукции в воздушном зазоре за счет снижения рабочей гармоники и наличия субгармоник. Это ведет к снижению обмоточного коэффициента, увеличению потерь [3,4].

Для решения этой проблемы были предложены СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом, в которых промежутки между модулями статора выполняют роль барьеров магнитного потока, подавляющих действие нежелательных гармоник [3-5]. Такие машины будем далее называть СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом статора. Эти машины были рассмотрены в ряде источников. В частности, в [5] предложена процедура оптимизации СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом статора с конфигурацией 24/28 (24 зубца статора, 28 полюсов; удвоенная 12/14) с магнитами на роторе на основе генетического алгоритма, однако сопоставление с оптимизированной традиционной СМсСОиПМ (с цельным статором) не проводилось.

В то же время в опубликованной литературе не было уделено достаточного внимания количественному сравнительному анализу характеристик СМсСОиПМ с традиционным (цельным) статором и разомкнутым магнитопроводом статора при использовании компьютерной оптимизации в конкретных приложениях.

В данной работе проводится сопоставление конструкций СМсСОиПМ с цельным и с разомкнутым магнитопроводом статором для безредукторного ветрогенератора малой мощности (1784 Вт, 338 об/мин). При этом рассматривается конфигурация СМсСОиПМ 18/24 (утроенная 6/8) с разомкнутым магнитопроводом статором и традиционная СМсСОиПМ 27/24 с цельным статором. Оптимальное проектирование обоих электрических машин произведено с использованием алгоритма Нелдера-Мида при одинаковом внешнем диаметре, длине и числе полюсов, равном 24 для ветрогенераторного приложения. Показаны преимуще-

ства конструкции машины с разомкнутым магнитопроводом статором с девятью ш-образными сегментами статора.

Поскольку в данном исследовании проводится сравнительный анализ конфигураций ветрогенераторов, при котором важен учет нагрузочного профиля ветротурбины и распределения скорости ветра, то используется метод замещающего профиля [6], позволяющий значительно сократить требуемые вычислительные ресурсы при оптимизации ветрогенераторов.

Исследуемые машины

Рис. 1а показывает традиционная СМсСОиПМ. На рис. 1б показана СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом, конструкция которой получается заменой части пазов конструкции, показанной на рис.1а, на магнитные барьеры, разделяющие сегменты.

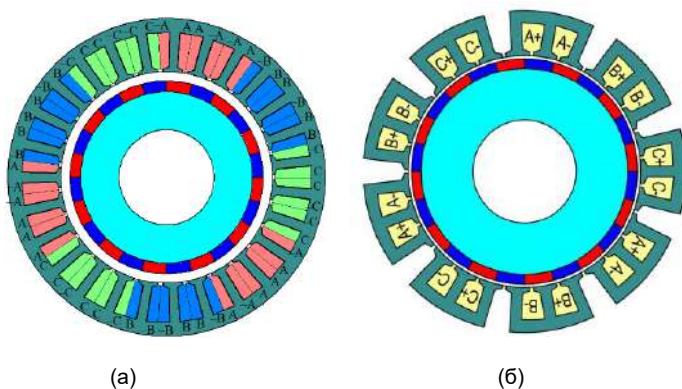


Рис. 1. Эскизы исследуемых машин: а – 27/24 СМсСОиПМ с цельным статором; б – СМсСОиПМ 18/24 с разомкнутым магнитопроводом.

Оптимизация машин

Как было объяснено в [6] в целях снижения вычислительной нагрузки при оптимизации, многоточечный рабочий цикл ветротурбины может быть заменен двухточечным, эквивалентным с точки зрения величины потерь в цикле. Было показано, что средние потери по рабочему циклу при применении замещающего профиля отличаются мало. Рис. 2 показывает нагрузочный профиль ветротурбины. В табл. 1 приведены параметры нагрузочных точек замещающего профиля.

Табл. 2 показывает фиксированные параметры 27/24 СМсСОиПМ. Табл. 3 показывает варьируемые параметры 27/24 СМсСОиПМ. Табл.4 показывает характеристики СМсСОиПМ 27/24 с цельным статором до и после оптимизации.

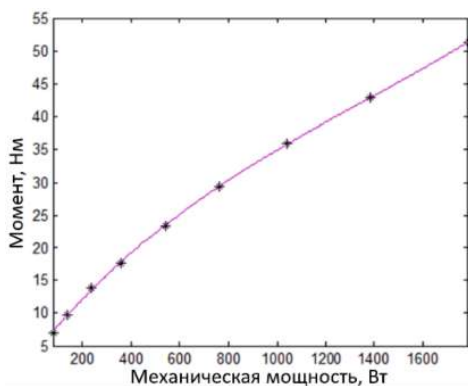


Рис. 2. Зависимость крутящего момента ветряной турбины от механической мощности.

Таблица 1. Двухточечный замещающий профиль нагрузки ветрогенератора

Нагрузочная тока, i	n_i , об/мин	$P_{мех\ i}$, Вт	T_i , Н·м	ρ_i
1	194	362	17,8	0,873
2	332	1784	51,4	0,127

На рис.3 показаны конструктивные параметры СМСОиПМ с цельным статором.

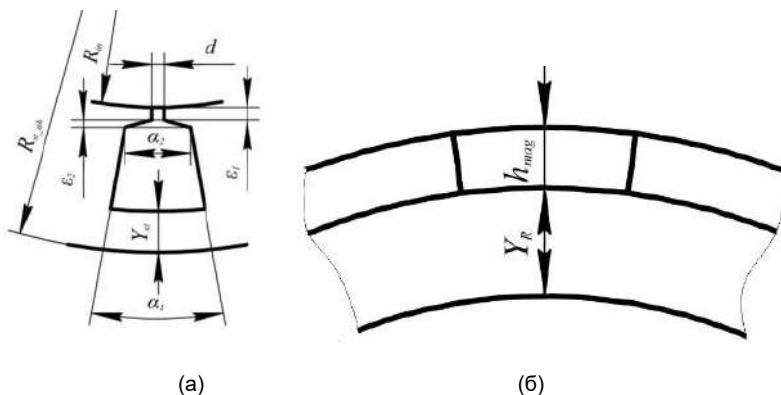


Рис. 3. Конструктивные параметры СМСОиПМ с цельным статором:
(а) Статор; (б) Ротор

Рис. 4 показывает модуль магнитной индукции в расчетной области до оптимизации. Рис. 5 показывает модуль магнитной индукции в расчетной области после оптимизации.

Таблица 2. **Неизменяемые параметры СМсСОиПМ с цельным статором**

Параметр	Величина
Внешний радиус статора R_1 , мм	80
Воздушный зазор δ , мм	0,5
Длина сердечника ротора и статора L , мм	100
Параметр статора ϵ_1 , мм	0,5
Параметр статора ϵ_2 , мм	2
Остаточная намагниченность, Тл	1,25
Коэрцитивная сила, кЭ	12
Марка стали	2412
Толщина листа стали, мм	0,5

Таблица 3. **Переменные параметры СМсСОиПМ с цельным статором**

Параметр	До оптимизации	После оптимизации
Внутренний радиус статора R_3 , мм	64	66,1
Ширина шлица статора d , мм	2	3,1
Угловой размер паза статора α_1 , рад	0,13	0,163
Угловой размер паза статора α_2 , рад.	0,11	0,157
Толщина магнитов h_{mag} , мм	2,3	2,08
Толщина ярма ротора, Y_R , мм	4,5	2,64
Толщина ярма статора, Y_{St} , мм	3	2,80
Угол ослабления поля в рабочей точке 2, электрических рад	0	0,239

Таблица 4. **Характеристики СМсСОиПМ цельным статором до и после оптимизации**

Параметр	До оптимизации		После оптимизации	
Номер рабочей точки i	1	2	1	2
Механическая мощность, Вт	362	1784	362	1784
Скорость, об/мин	194	332	194	332
Потери в магнитопроводе ротора, Вт	0,0	0,1	0.0	0.1
Потери в магнитопроводе статора, Вт	12,2	21,4	11.0	18.3
Потери в магнитах, Вт	0,4	2,0	0.6	2.2
Потери в обмотке, Вт	32,7	276,5	38.9	334.1
Полные потери, Вт	45,3	300,0	50.5	354.8
КПД, %	87,5	83,2	86.1	80.1
Активная мощность, Вт	317	1484	312	1430
Полная мощность, ВА	331	1585	324	1450
Требуемая мощность, ВА	340	1669	331	1493
Средние потери, Вт	77,7		89,1	
Средний КПД, %	85,7		83,6	
Пульсации момента, %	14,4	6,6	8.8	5.2
Масса меди, кг	1,29		1,47	
Масса магнитопровода статора, кг	3,44		2,49	
Масса магнитов, кг	0,67		0,62	
Масса магнитопровода ротора, кг	1,28		0,79	
Полная масса, кг	6,68		5,38	

На основании сравнения характеристик СМсСОиПМ до и после оптимизации, показанных в табл.4, можно заключить после оптимизации потери возросли на 14,8 %, что является не большой платой за уменьшение массы на 19,4 %. Кроме того, отношение P_{req}/P_{real2} уменьшилось на 7,1 %, масса магнитов уменьшилась на 6,4%.

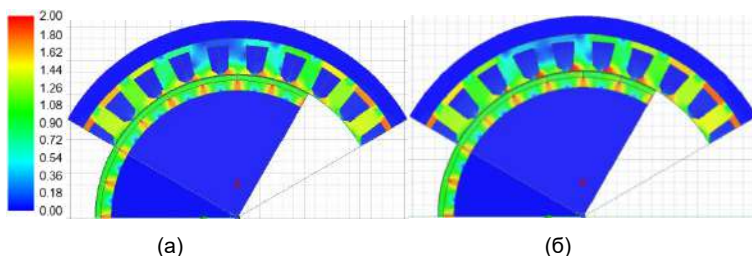


Рис. 4. Модуль индукции (Тл) в расчетной области СМсСОиПМ с цельным статором в рабочих точках двухточечного замещающего профиля до оптимизации: (а) Рабочая точка 1; (б) Рабочая точка 2.

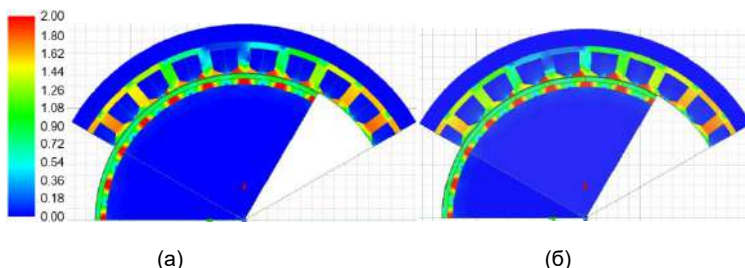


Рис. 5. Модуль индукции (Тл) в расчетной области СМсСОиПМ с цельным статором в рабочих точках двухточечного замещающего профиля после оптимизации: (а) Рабочая точка 1; (б) Рабочая точка 2.

На рис. 6 показаны параметры сегмента ш-образного СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом. В табл. 5 показаны величины переменных параметров СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом до и после оптимизации.

В табл. 6 показаны характеристики СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом до и после оптимизации.

В ходе оптимизации СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом потери увеличились на 12,6 %, что является результатом компромисса для

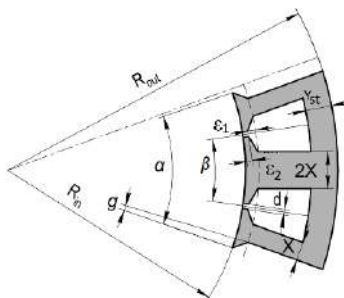


Рис. 6. Параметры сегмента ш-образного СМсСОиПМ разомкнутым магнитопроводом

улучшения других целевых показателей. $P_{\text{req}}/P_{\text{real2}}$ уменьшено 11,9 %, масса магнитов снижена на 7,2%, общая масса снижена на 19,5 %. Начальное приближение показывает, что пульсации момента могут достигать весьма больших значений (64%). Однако в ходе оптимизации пульсации момента снижены в 6,8 раза.

Таблица 5. Переменные параметры 18/24 СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом до и после оптимизации

Параметр	До оптимизации	После оптимизации
Внутренний радиус статора R_3 , мм	64	131,3
Ширина шлица статора d , мм	2	3,06
Угловой размер паза статора α_1 , рад	4	4,02
Угловой размер паза статора α_2 , рад.	0,655	0,646
Толщина магнитов h_{mag} , мм	0,300	0,232
Толщина ярма ротора, Y_R , мм	2,3	2,07
Толщина ярма статора, Y_{St} , мм	0,01	0,0286
Угол ослабления поля в рабочей точке 2, электрических рад	4,5	3,428
Внутренний радиус статора R_3 , мм	3	4,08
Ширина шлица статора d , мм	0	0,177

Таблица 6. Характеристики СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом статором до и после оптимизации

Параметр	До оптимизации		После оптимизации	
Номер рабочей точки i	1	2	1	2
Механическая мощность, Вт	362	1784	363	1785
Скорость, об/мин	194	332	194	332
Потери в магнитопроводе ротора, Вт	0,1	0,4	0,3	0,5
Потери в магнитопроводе статора, Вт	11,7	20,6	10,7	18,0
Потери в магнитах, Вт	1,2	4,8	1,4	4,7
Потери в обмотке, Вт	27,2	237,2	32,4	276,6
Полные потери, Вт	40,1	263,0	44,8	299,8
КПД, %	88,9	85,3	87,7	83,2
Активная мощность, Вт	322	1521	318	1485
Полная мощность, ВА	337	1701	331	1531
Требуемая мощность, ВА	382	1858	340	1600
Средние потери, Вт	68,4		77,2	
Средний КПД, %	87,4		85,8	
Пульсации момента, %	64,2	17,1	9,5	5,0
Масса меди, кг	1,50		1,00	
Масса магнитопровода статора, кг	2,66		2,61	
Масса магнитов, кг	0,67		0,62	
Масса магнитопровода ротора, кг	1,68		1,01	
Полная масса, кг	6,50		5,24	

Сравнение исследуемых машин

Табл.7 и Табл. 8 показывают сопоставление характеристик, а также массы и стоимости материалов оптимизированных конструкций 18/24 СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом с традиционной СМсСОиПМ 27/24.

Таблица 7. Сравнение характеристик исследуемых машин

Параметр	Традиционная СМсСОиПМ 27/24		СМсСОиПМ с разомкну- тым магнитопроводом 18/24	
	1	2	1	2
Нагрузочная точка				
Механическая				
мощность, Вт	362	1784	363	1785
Скорость, об/мин	194	332	194	332
Потери в сердечнике				
ротора, Вт	0,0	0,1	0,3	0,5
Потери в сердечнике				
статора, Вт	11,0	18,3	10,7	18,0
Потери в магнитах, Вт	0,6	2,2	1,4	4,7
Потери в обмотке, Вт	38,9	334,1	32,4	276,6
Полные потери, Вт	50,5	354,8	44,8	299,8
КПД, %	86,1	80,1	87,7	83,2
Активная мощность, Вт	312	1429	318	1485
Полная мощность, Вт	324	1450	331	1531
Требуемая мощность, Вт	331	1493	340	1600
Средние потери, Вт		89,1		77,2
Средний КПД, %		83,6		85,8
Пульсации момента, %	8,8	5,2	9,5	5,0

Таблица 8. Материалозатраты и капиталозатраты исследуемых машин

Параметр	Традиционная СМсСОиПМ 27/24	СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом 18/24
Масса меди, кг	1,47	1,00
Масса сердечника		
статора, кг	2,49	2,61
Масса магнитов, кг	0,62	0,62
Масса сердечника		
ротора, кг	0,79	1,01
Полная масса, кг	5,38	5,24
Стоимость меди, \$	10,29	7
Стоимость стали, \$	3,3	3,6
Стоимость магнитов, \$	78,5	78,5
Стоимость активных		
материалов, \$	92,1	89,1
Внешний диаметр		
статора, мм	160	160
Длина статора, мм	100	100

Рис. 7 показывает сравнение зависимостей для сравниваемых конфигураций в точках исходного 9-точечного профиля, показанного рис. 2.

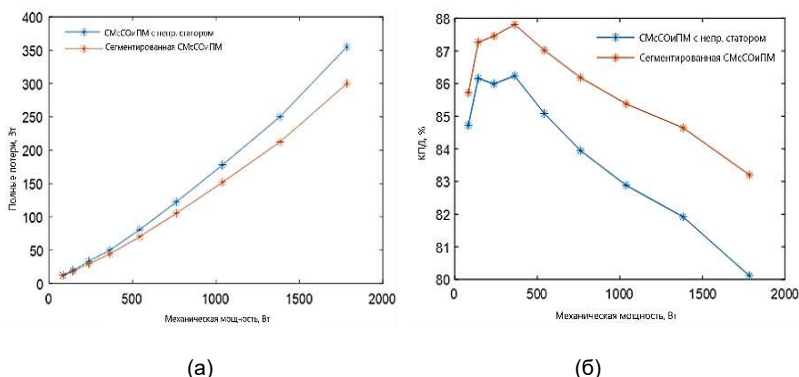


Рис. 7. Сравнение характеристик СМсСОиПМ с цельным и разомкнутым магнитопроводом: (а) Полные потери; (б) КПД.

На основе выполненного сопоставительного анализа можно заключить, что в случае СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом:

1) Потери в обмотке снижены в $334,1/276,6 = 1,21$ раза;

2) Потери уменьшены, а КПД увеличен во всем рабочем диапазоне.

При этом средние потери в рабочем цикле уменьшены на $100\%(89,1 - 77,2)/89,1 = 13,4\%$;

3) Масса меди обмотки снижена в $1,47/1 \approx 1,5$ раза;

4) Остальные важные характеристики отличаются незначительно (требуемая мощность инвертора, пульсации момента, масса активных материалов, стоимость активных материалов).

Выводы

В данной статье сравниваются характеристики традиционной СМсСОиПМ и СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом в приложении ветрогенератора. Оптимальное проектирование обоих электрических машин произведено с использованием алгоритма Нелдера-Мида при одинаковом внешнем диаметре, длине статора и числе полюсов.

Показано, что в данном приложении СМсСОиПМ с разомкнутым магнитопроводом имеет следующие основные преимущества: потери в обмотке меньше в 1,2 раза, общие потери меньше на 13,4%, масса меди меньше в 1,5 раза. При этом расход дорогих редкоземельных магнитов практически одинаков для обоих машин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (базовая часть госзадания, проект № FEUZ-2023-0013).

Литература

1. A. El-Refai, "Fractional-slot concentrated-windings: A paradigm shift in electrical machines," 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Paris, France, 2013, pp. 24-32, doi: 10.1109/WEMDCD.2013.6525162.
2. K. Ahsanullah, R. Dutta and M. F. Rahman, "Analysis of Low-Speed IPMMs With Distributed and Fractional Slot Concentrated Windings for Wind Energy Applications," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 11, pp. 1-10, Nov. 2017, Art no. 3101710, doi: 10.1109/TMAG.2017.2726117.
3. G. Dajaku and D. Gerling, "Low costs and high-efficiency electric machines," 2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2012, pp. 1-7, doi: 10.1109/EDPC.2012.6425093.
4. G. Dajaku and D. Gerling, "A novel 12-teeth/10-poles PM machine with flux barriers in stator yoke," 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, 2012, pp. 36-40, doi: 10.1109/ICEIMach.2012.6349835.
5. W. Zhang, G. J. Li, Z. Q. Zhu, B. Ren and M. Michon, "Optimization of Modular SPM Machines Considering Stator Modularity," 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Hartford, CT, USA, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEMDC47953.2021.9449609.
6. Prakht, V.; Dmitrievskii, V.; Kazakbaev, V. Optimal Design of Gearless Flux-Switching Generator with Ferrite Permanent Magnets. Mathematics 2020, 8, 206, doi.org/10.3390/math8020206.

УДК 621.313

Ю.Б. КАЗАКОВ, д.т.н., профессор;
И.В. НОВИКОВ, аспирант;

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

E-mail: elmash@em.ispu.ru , nov_37@mail.ru

Оптимизация конструкции асинхронного электродвигателя с целью снижения электромагнитного шума и вибраций путем использования стали с содержанием никеля

Аннотация. Приведен обзор возможности оптимизации конструкции асинхронного электродвигателя с целью снижения электромагнитного шума и вибраций. Особое внимание уделено влиянию магнитомягких материалов на виброшумовые характеристики. Произведен расчёт уровня звукового давления при использовании разных сталей.

Ключевые слова: асинхронные электродвигатели, конструкция, электротехническая сталь, электромагнитный шум и вибрации, уровень звукового давления.

Yu.B. KAZAKOV, Doctor of Engineering, professor;
I.V. NOVIKOV, graduate student;

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: elmash@em.ispu.ru , nov_37@mail.ru

Optimization of the asynchronous electric motor design in order to reduce electromagnetic noise and vibrations by using nickel-containing steel

Abstract. An overview of the possibility of optimizing the design of an asynchronous electric motor in order to reduce electromagnetic noise and vibrations is given. Special attention is paid to the influence of magnetically soft materials on vibration-noise characteristics. The sound pressure level was calculated when using different steels.

Key words: asynchronous electric motors, construction, electrical steel, electromagnetic noise and vibrations, sound pressure level.

Снижение электромагнитного шума и вибраций асинхронных электродвигателей является актуальной задачей в области машиностроения и энергетики, поскольку высокие уровни шума и вибраций негативно сказываются на надежности и долговечности оборудования, а также могут вызывать дискомфорт у работников в производственной среде. Эффективные методы уменьшения этих эффектов способствуют повышению производительности, экономии энергии и улучшению условий труда. При этом, с учетом растущих требований к экологии и устойчивому развитию, исследование и внедрение технологий, направленных на снижение шумов и вибраций, становятся особенно значимыми в рамках мировых инициатив по снижению негативного воздействия промышленных процессов на окружающую среду.

Оптимизация конструкции асинхронного электродвигателя с целью снижения электромагнитного шума и вибраций является важной задачей для повышения его эффективности и надежности. К основным направлениям, которые могут быть использованы для достижения этой цели, относятся: совершенствование конструкции статора и ротора, вследствие улучшения геометрии магнитных полей, оптимизация схемы обмоток, частотный контроль для управления скоростью вращения, применение разных электротехнических сталей [1].

Использование магнитомягких материалов для снижения электромагнитного шума и вибраций в асинхронных электродвигателях представляет собой многообещающий подход. Этот метод позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики электродвигателей, но и повысить их долговечность и надежность.

Электротехническая сталь с содержанием никеля играет важную роль в улучшении виброшумовых характеристик асинхронных электродвигателей. Никель, как легирующий элемент, улучшает магнитные

свойства стали, что в свою очередь влияет на эффективность и уровень вибраций в электродвигателях. К основным достоинствам стали с содержанием никеля относятся: улучшение магнитных свойств и снижение потерь на вихревые токи, улучшение механических характеристик стали, уменьшение влияния явления магнитострикции на шум и вибрации вследствие того, что подобная сталь имеет отрицательную магнитострикцию [2-3]

В работе произведен расчёт уровня звукового давления для пяти четырехполюсных асинхронных электродвигателей разных габаритов при номинальном режиме работы в случае применения легированной стали с добавлением кремния и стали с содержанием никеля [4]. Полученные данные сведены в таблицу 1.

Влияние стали учтено путем изменения магнитной проницаемости, коэффициента насыщения магнитной цепи и зубцов, так же были выполнены перерасчёты магнитной индукции в зазоре [5].

Эффективное значение составляющих виброускорения определяется:

$$X_k = 20 \cdot \lg \left(\frac{2,79 \cdot |f_0^2| \cdot A}{2 \cdot 10^{-2}} \right)$$

где A – амплитуда деформаций от высших гармоник на частоте f_0 , мм, f_0 – частота силовых волн, Гц.

Уровень звукового давления определяется:

$$L = 20 \cdot \lg \left(\frac{D_k}{2} |f_0| \cdot A \right) - L_{p2} - L_{p3} - 20 \cdot \lg(l_i \cdot 10^{-3} + 1) + 68,$$

где D_k – наружный диаметр корпуса, мм, l_i – длина сердечника статора, мм, L_{p2} и L_{p3} определяются по таблице в зависимости от порядка силовой волны r .

Таблица 1. Уровень звукового давления в зависимости от электротехнической стали

Электродвигатель	Уровень звукового давления, дБ	
	Легированная сталь с добавлением кремния	Легированная сталь с добавлением никеля
RA71	56,3	51,24
RA100	61,1	57,37
RA160	65,28	60,84
RA200	72,4	68,21
RA315	76,3	72,93

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что, используя легированную сталь с добавлением никеля возможно добиться снижения уровня звукового давления в среднем на 6,5 % относительно стали с содержанием кремния.

Таким образом, введение никеля в состав электротехнической стали является эффективным решением для улучшения виброшумовых характеристик асинхронных электродвигателей. Оно позволяет значи-

тельно улучшить производительность, долговечность и эффективность работы двигателей, что делает их более привлекательными для энергетики. Однако следует учитывать, что оптимальное содержание никеля должно быть выбрано исходя из конкретных условий эксплуатации и требований к двигателю. Так же немаловажным негативным фактором является высокая стоимость подобной стали, в связи с чем окончательный выбор должен быть обоснован технико-экономическими показателями конкретной электромеханической системы.

Литература

1. В.Т. Медведев, В.Я. Геча, В.С. Малышев и др. Вибрации и шум электрических машин, трансформаторов и реакторов: учеб. пособие / под ред. В.Т. Медведева. М.: Изд-во МЭИ, 2018. 428 с.
2. Вопросы электромеханики. Методы проектирования маломощных электрических машин // Труды МЭИ. 1980. Вып. 501. С. 45-48.
3. И.Г. Шубов. Шум и вибрация электрических машин / И.Г. Шубов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Электронный ресурс: eldin.ru/catalog-2024_03_05.pdf (дата обращения: 02.04.2025).
5. Н.В. Астахов, В.С. Малышев, В.Т. Медведев и др. Расчёт магнитных вибраций асинхронных двигателей / М.: Изд-во МЭИ, 1985

УДК 621.313

В.Н. КАРАУЛОВ, к.т.н., доцент
Е.А. КУРЛАКОВ, магистр

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: wiktor2012@mail.ru

Математическое моделирование электромеханических процессов в синхронном реактивном двигателе с TLA-ротором и демпферной обмоткой в установившихся и переходных режимах

Аннотация. Используется классическая параметрическая модель СРД, основанная на теории двух реакций. Представлен метод расчёта параметров модели СРД. Для расчёта электромеханических процессов СРД используются уравнения Парка-Горева. Представлены результаты расчета электромеханических процессов в СРД: прямой пуск двигателя при симметричном питании; работа СРД при несимметричном питании. Результаты расчётов сопоставлены с результатами полевого моделирования СРД в среде Ansys Maxwell.

Ключевые слова: синхронный реактивный двигатель, TLA–ротор, демпферная обмотка, параметрическая модель, установившиеся и переходные режимы работы.

V.N. KARAULOV, Candidate Of Technical Sciences
E.A. KURLAKOV, master

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: wikt0r2012@mail.ru

Mathematical modeling of electromechanical processes in a synchronous reluctance motor with a TLA-rotor and damper winding in steady-state and transient modes

Abstract. The classical parametric model of the SRM is used, based on the theory of two reactions. A method for calculating the parameters of the SRM model is presented. The Park-Gorev equations are used to calculate the electromechanical processes of the SRM. The results of the calculation of electromechanical processes in the SRM are presented: direct engine start with symmetrical power supply; operation of the SRM with asymmetrical power supply. The calculation results are compared with the results of field simulation of the SRM in the Ansys Maxwell environment.

Key words: synchronous reluctance engine, TLA rotor, damper winding, parametric model, steady-state and transient operating modes.

Для моделирования СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой используется классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций. Параметры модели: индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям x_d и x_q , определены на основе полевых расчётов статических состояний продольного и поперечного магнитного поля с учетом насыщения магнитной цепи [1]; параметры демпферной обмотки r_{kd} , x_{kd} и r_{kq} , x_{kq} определены на основе полевого моделирования опыта однофазного питания двух фаз. Из осциллограмм тока и напряжения найдены: действующие значения напряжения и тока обратной последовательности в фазе статора (U_{2q} , I_{2q}); сдвиг по фазе кривых напряжения и тока (φ_q). Рассчитано сопротивление фазы для тока обратной последовательности I_{2q} : полное (Z_{2q}), активное (r_{2q}) и индуктивное (x_{2q}):

$$Z_{2q} = \frac{U_{2q}}{I_{2q}};$$

$r_{2q} = Z_{2q} \cdot \cos(\varphi_q)$; $x_{2q} = Z_{2q} \cdot \sin(\varphi_q)$. Соответственно, активное и индуктивное сопротивление рассеяния фазы приведённой поперечной демпферной обмотки рассчитаны по формулам $r_{kq} = r_{2q} - r_1$; $x_{kq} = x_{2q} - x_{s1}$, где r_1 и x_{s1} – активное сопротивление проводов и индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора. Аналогично определены активное и индуктивное сопротивление рассеяния фазы, приведенной продольной демпферной обмотки.

Математической моделью электромеханических процессов в СРД служат уравнения Парка-Горева. Рассчитан процесс прямого пуска и установившийся режим работы СРД при симметричном и несимметрич-

ном питании. Результаты расчётов сопоставлены с результатами полевого моделирования СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой в среде Ansys Maxwell.

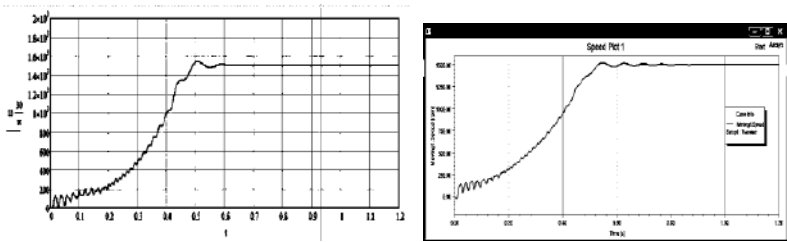


Рис. 1. Частота вращения ротора: а) инженерный расчёт;
б) полевого расчёт в Ansys Maxwell

На рис. 1 представлены результаты расчёта электромеханического процесса прямого пуска СРД при номинальном тормозном моменте на валу.

На рис. 2-3 и в табл. 1 представлены результаты расчёта установившегося электромеханического процесса работы СРД при несимметричном питании.

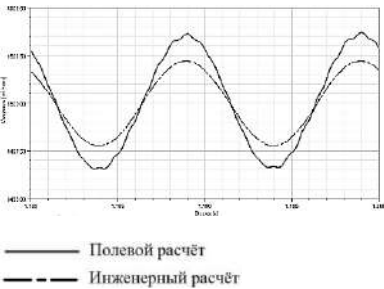


Рис. 2. Частота вращения ротора

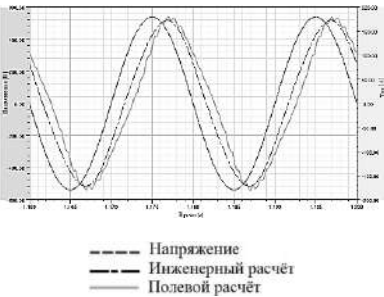


Рис. 3. Напряжение и ток в фазе
статора

Таблица 1. Энергетические показатели в установившемся режиме работы при несимметричном питании

Энергетическое показатели	Инженерный расчет	Ansys Maxwell
η	0,974	0,964
$\cos(\varphi)$	0.665	0.6827

Энергетические показатели машины в установившемся режиме работы при несимметричном питании рассчитаны по следующим формулам:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (M \cdot \omega) \cdot dt}{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C) \cdot dt};$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C) \cdot dt}{U_A \cdot I_A + U_B \cdot I_B + U_C \cdot I_C}$$

Заключение

Показано, что классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций, позволяет быстро и качественно анализировать установившиеся и переходные режимы работы синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой при различных условиях питания и механической нагрузки.

Литература

1. Караулов В.Н., Доржинкевич А.Ф. Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором в установившихся и переходных режимах. // Вестник ИГЭУ.2023. Вып. 4. С. 46-5

УДК 621.926.5:532.546:537.622

В.А. ФИЛИППОВ, к.т.н., доцент
В.Е. ШОРОНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: 9basy9@gmail.com, volodymyr.shoronov@yandex.ru

Энергетические показатели электромагнитного магнитожидкостного сепаратора на переменном и постоянном токе

Аннотация. Данная статья содержит результаты экспериментов по измерению потребляемой электромагнитным магнитожидкостным сепаратором (ЭМЖС) мощности в режимах питания переменным и постоянным током.

Ключевые слова: постоянный ток, переменный ток, магнитожидкостная сепарация, намагниченность насыщения магнитной жидкости.

V.A. FILIPPOV, Ph.D.
V.E. SHORONOV, PhD student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: 9basy9@gmail.com, volodymyr.shoronov@yandex.ru

Energy Performance of Electromagnetic Magnetic Fluid Separator in AC and DC Modes

Abstract. This paper presents experimental results on power consumption measurements of an electromagnetic magnetic fluid separator (EMFS) operating under alternating current (AC) and direct current (DC) power supply modes.

Key words: direct current, alternating current, magnetic fluid separation, magnetic fluid saturation magnetization.

Технология ЭМЖС является новой относительно традиционных методов разделения материалов. Следует отметить, что ЭМЖС позволяет с высокой точностью разделять немагнитные материалы достаточно малого размера. Уникальные свойства магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле делают возможным разделение немагнитных материалов по плотности.

Промышленные ЭМЖС предназначены для работы на постоянном токе. Вопрос работы ЭМЖС на переменном токе имеет крайне малое количество исследований. Хотя такой режим питания, потенциально, имеет ряд преимуществ, таких как: предотвращение появления агрегатов и увеличение скорости продвижения сепарируемого материала. Это может благоприятно отразиться на точности и производительности устройства.

Не смотря на положительные эффекты питания на переменном токе, не стоит забывать и про основные характеристики электромеханических приборов. Одним из таких является энергоэффективность. Показателем сравнения энергоэффективности режимов питания ЭМЖС было принято значение выталкивающей силы, которая действует в рабочем зазоре.

Измерения проводились с помощью физической модели ЭМЖС, которая имеет шихтованный магнитопровод. В эксперименте использовались магнитные жидкости с намагниченностями насыщения $M_s = 15, 20, 25$ и 30 кА/м.

Результаты измерений потребляемой активной мощности ЭМЖС на постоянном и переменном токе представлены в табл. 1 и 2, соответственно.

Полученные зависимости потребляемой мощности от величины выталкивающей силы представлены на рис.1.

В табл. 3 отражена разница в потребляемой мощности ЭМЖС при работе на переменном и постоянном токе.

Таблица 1. Потребляемая активная мощность на постоянном токе

Выталкивающая сила F, Н	Намагниченность насыщения магнитной жидкости M_s , кА/м			
	15	20	25	30
	Полная потребляемая мощность P, Вт			
0	6,237	4,403	2,67	2,389
0,01	8,406	6,129	3,744	3,321
0,02	12,084	8,005	4,777	4,388
0,03	18,073	11,282	6,525	5,415
0,04	25	16,062	8,622	6,979
0,05	34,093	21,636	11,277	8,734
0,06	45,574	28,785	14,666	11,141
0,07	59,42	37,779	19,291	14,445
0,08	74,91	49,702	24,885	18,861

Таблица 2. Потребляемая активная мощность на переменном токе

Выталкивающая сила F, Н	Намагниченность насыщения магнитной жидкости M_s , кА/м			
	15	20	25	30
	Полная потребляемая мощность P, Вт			
0	13,109	9,761	5,676	4,741
0,01	16,49	13,281	8,776	7,874
0,02	21,833	19,313	11,707	10,234
0,03	29,241	28,515	16,292	15,268
0,04	39,639	38,621	21,585	18,894
0,05	53,662	52,3	27,984	24,077
0,06	70,028	68,406	35	29,902
0,07	87,468	84,987	44,59	37,268
0,08	105,304	98,269	54,997	45,484

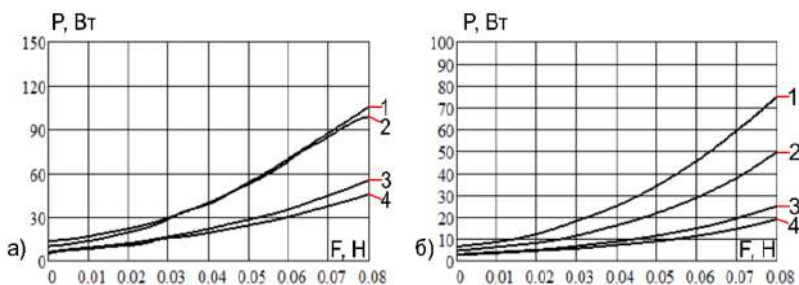


Рис. 1. Зависимости потребляемой мощности ЭМЖС от выталкивающей силы:
 а – на переменном токе, б – на постоянном токе,
 1 - $M_s = 15$ кА/м, 2 - $M_s = 20$ кА/м, 3 - $M_s = 25$ кА/м, 4 - $M_s = 30$ кА/м

Таблица 3. Разница в потребляемой мощности

Выталкивающая сила F, Н	Намагниченность насыщения магнитной жидкости Ms, кА/м			
	15	20	25	30
	Разница в потребляемой мощности, %			
0	110,187	121,689	112,635	98,466
0,01	96,167	116,71	134,422	137,12
0,02	80,681	141,246	145,053	133,219
0,03	61,797	152,738	149,683	181,941
0,04	58,559	140,442	150,341	170,744
0,05	57,401	141,732	148,148	175,671
0,06	53,658	137,642	138,639	168,407
0,07	47,204	124,956	131,146	157,996
0,08	40,573	97,716	121,006	141,156

В заключение можно отметить, что для достижения одного и того же значения выталкивающей силы на переменном токе требуется в разы больше мощности, чем на постоянном. Этот факт ставит под сомнение целесообразность эксплуатации ЭМЖС на переменном токе, однако следует оценить в следующих исследованиях положительные эффекты, упомянутые ранее.

Литература

1. Морозов, Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. Иваново: ФГБОУВПО ИГЭУ, 2011. 264 с. ISBN 978-5-89482-772-8.
2. Филиппов, В.А. Повышение эффективности электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Филиппов Василий Александрович. Самара, 2020. 134 с. EDN SKQOXP.

УДК 62-97/-98

С.А. НЕСТЕРОВ, к.т.н., заведующий кафедрой ЭМ
В.Д. БАКЛАНОВ, магистрант
А.А. МИРОНОВА, аспирант

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

Вязкостный разогрев магнитной жидкости при работе магнитожидкостного герметизатора

Аннотация. Данная статья содержит результаты экспериментального исследования вязкостного разогрева магнитной жидкости в зазоре магнито-

жидкостного герметизатора (МЖГ) при вращении вала с линейными скоростями до 25 м/с.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитожидкостный герметизатор, вязкостный разогрев, перепад давления.

S. A. NESTEROV, Ph.D., Head of the EM Department
V. D. BAKLANOV, student
A.A. MIRONOVA, PhD student

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

Viscous heating of magnetic fluid during operation of a magnetic fluid sealer

Abstract. This paper contains the results of experimental study of viscous heating of magnetic fluid in the gap of a magnetic fluid sealer (MFS) during shaft rotation with linear velocities of up to 25 m/sec.

Key words: magnetic fluid, magnetic fluid sealer, viscous heating, pressure drop.

Технология магнитожидкостной герметизации вращающихся валов электродвигателей является развивающейся и перспективной областью применения МЖ. Благодаря относительно простой конструкции и возможности выполнения в небольших габаритах установка магнито-жидкостных герметизаторов (МЖГ) вместо подшипниковых крышек электродвигателей обеспечивает гарантированное отделение внутреннего объёма электродвигателя от агрессивной или взрывоопасной наружной среды с минимальным трением и отсутствием механического износа поверхности вала, что характерно для уплотнений традиционных конструкций [1-4].

Основным фактором, сдерживающим применение МЖГ на мощных машинах с вращающимися валами большого диаметра является рост линейной скорости на поверхности вала и связанные с этим деструктивные эффекты, происходящие в слое МЖ под действием вязкостного разогрева. Работ, посвящённых анализу теплового состояния и созданию моделей для расчёта поля температур МЖГ к настоящему времени практически нет.

На рис. 1 показано изменение распределения температуры в МЖГ при вращении вала со скоростью 25 м/с, индукции магнитного поля 1,2 Тл и величиной зазора между валом и полюсной приставкой 0,5 мм. До включения приводного двигателя МЖ и МЖГ имели комнатную температуру в 296 К. МЖ, как основной источник теплоты, имеет на данных снимках максимальную температуру, равную верхнему пределу тепловой шкалы. Температура в верхнем левом углу снимка равна температуре зубчатого вала МЖГ в непосредственной близости от магнито-жид-

костной пробки. Анализ распределения температуры показывает, что в первые 10 секунд после начала вращения вала температура МЖ в зазоре резко возрастает. Для скорости 25 м/с – на 36,7 К. При этом происходит резкое снижение вязкости МЖ, Жидкостное трение уменьшается и динамика разогрева значительно снижается.

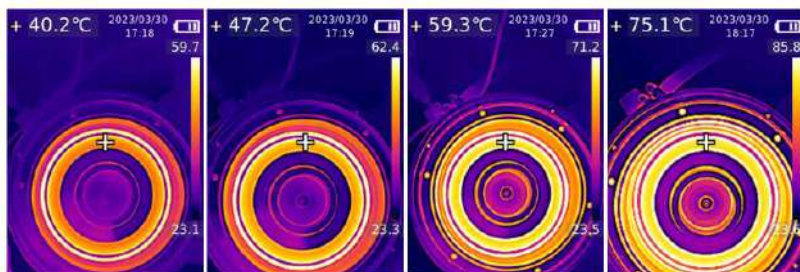


Рис. 1. Тепловое состояние МЖГ. Линейная скорость 25 м/с:
а – 10 секунд, б – 2 минут, в – 10 минут, г – 60 минут

Вязкостная диссипация энергии в магнитожидкостной пробке высокоскоростных уплотнений приводит не только к значительному разогреву МЖ при работе, но также увеличивает суммарные потери в электродвигателе. На рис. 2 представлены изменение рассеиваемой мощности и температуры МЖ при линейной скорости на поверхности вала однозубцового МЖГ 25 м/с. Рост температуры МЖ в первые несколько секунд после начала вращения вала приводит к резкому снижению вязкости и как следствие уменьшению момента сопротивления МЖГ и рассеиваемой мощности. Скорость изменения температуры и мощности определяется температурной зависимостью вязкости МЖ.

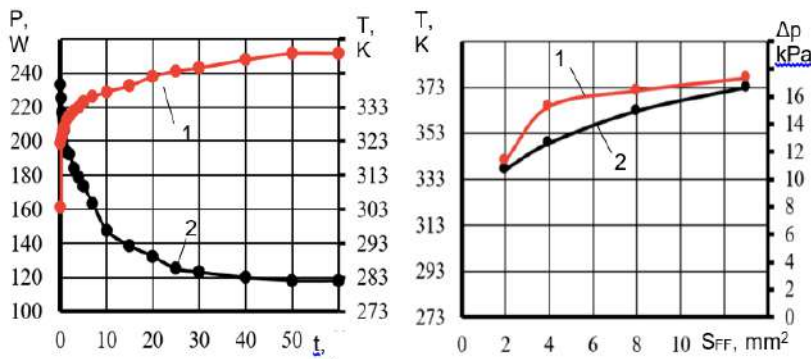


Рис. 2. Тепловое состояние МЖГ. Линейная скорость 25 м/с:
а – 10 секунд, б – 2 минут, в – 10 минут, г – 60 минут

Выбор необходимого объема МЖ для заправки МЖГ может оказать существенное влияние на работоспособность высокоскоростных уплотнений. На рис. 3 представлено экспериментально полученное изменение критического давления МЖГ и установившейся температуры МЖ в зависимости от площади поперечного сечения магнитоожидкостной пробки, напрямую связанной с объемом заправляемой жидкости. Видно, что температура, при увеличении объема МЖ, растёт практически линейно, а удерживаемый МЖГ перепад давления значительно возрастает при увеличении площади МЖ пробки от 2 до 4 мм, однако в дальнейшем при добавлении МЖ растёт уже не так значительно.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, <https://rscf.ru/project/22-79-00156/>

Литература

1. Орлов Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалёв, Н.К. Мышкин [и др]; под ред. проф Д.В. Орлова, проф. В.В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 275 с.
2. Морозов Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. Иваново: ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина", 2011. 264 с.
3. Сайкин М.С. Магнитоожидкостные герметизаторы технологического оборудования: монография / М.С. Сайкин. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2017. – 136 с: ил.
4. Казаков Ю.Б. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков и др. Иваново, ИГЭУ, 2010. 184 с.

УДК 62-97/-98

С.А. НЕСТЕРОВ, к.т.н., зав. кафедрой ЭМ
В.Д. БАКЛАНОВ, магистрант
А.А. МИРОНОВА, аспирант

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

Влияние эксцентриситета вала на работоспособность магнитоожидкостного герметизатора

Аннотация. Данная статья содержит результаты экспериментального исследования и математического моделирования работоспособности магнитоожидкостного герметизатора (МЖГ) при несоосности вращающегося вала и неподвижных полюсных приставок.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитоожидкостный герметизатор, эксцентриситет, перепад давления.

S. A. NESTEROV, Ph.D., Head of the EM Department
V. D. BAKLANOV, student
A.A. MIRONOVA, PhD student

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

Effect of shaft eccentricity on the performance of the magnetic fluid sealer

Abstract. This paper contains the results of the experimental study and mathematical modeling of the performance of the magnetic fluid sealer (MFS) at misalignment of the rotating shaft and fixed pole attachments.

Key words: magnetic fluid, magnetic fluid sealer, eccentricity, pressure drop.

Технология магнитожи́дкостной герметизации вращающихся валов является довольно малораспространённой относительно традиционных методов уплотнения, хотя и позволяет с абсолютной герметичностью разделять два газовых объёма с перепадом давления вплоть до нескольких атмосфер. Уникальные свойства магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле делают возможным удержание её магнитным полем в зазоре между вращающейся и неподвижной частью герметизатора.

Для электродвигателей с МЖГ актуальным вопросом является влияние на критический перепад давления увеличения эксцентриситета уплотняемого зазора. Кроме того, рабочий зазор электродвигателя общепромышленного применения может в несколько раз превышать зазор стандартный для МЖГ из-за чего допустимые диапазоны отклонений могут не совпадать, что также подчеркивает необходимость в дополнительных исследованиях.

Для исследования взаимосвязанных физических процессов, происходящих в зазоре МЖГ выполнено численное моделирование методом конечных элементов. В результате совместного расчета гидродинамического и магнитного полей получены распределения в рабочем зазоре МЖГ магнитной индукции, поля скоростей и давлений, показанные на рис. 1.

Для подтверждения полученных результатов проведено экспериментальное исследование влияния эксцентриситета уплотняемого МЖГ зазора на его рабочие характеристики.

На рис. 2 показан критический перепада давления от линейной скорости на поверхности вала для МЖГ с зубцом на валу. С увеличением эксцентриситета распределение магнитного поля меняется и критический перепад давления определяется величиной большего зазора с меньшей индукцией магнитного поля. Сплошными линиями на рис. 2 показаны результаты экспериментального исследования, штриховыми – результаты математического моделирования. Расхождения обусловлены вибрацией и не идеальной геометрией зубца опытной установки.

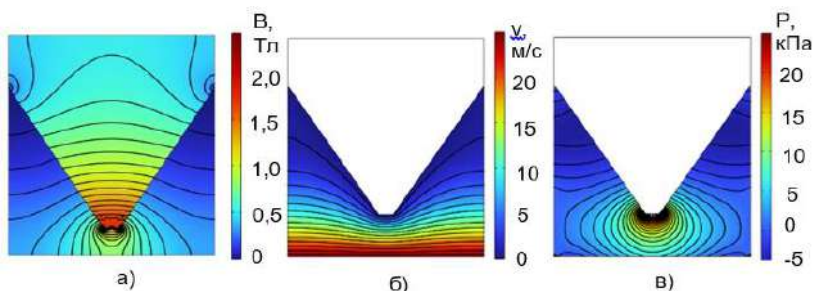


Рис. 1. Результаты численного расчёта взаимодействующих физических полей.

а – распределение магнитной индукции, б – поле скоростей в МЖ при $v = 25$ м/с, в – распределение давления в МЖ при $v = 25$ м/с.

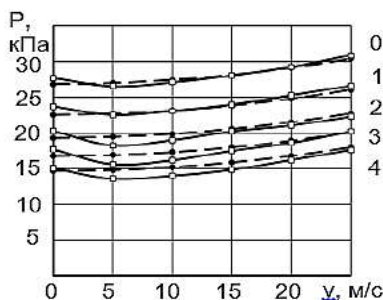


Рис. 2. Изменение давления от линейной скорости на поверхности вала. Зубец на валу, зазор 0,5 мм. 0 – эксцентриситет 0 мм (0 о.е.), 1 – 0,1 мм (0,2 о.е.), 2 – 0,2 мм (0,4 о.е.), 3 – 0,3 мм (0,6 о.е.), 4 – 0,4 (0,8 о.е.).

Из зависимостей на рис. 3 следует, что при увеличении величины эксцентриситета удерживаемый перепад давления уменьшается, но даже с эксцентриситетом 80% от величины уплотняемого зазора уплотнение сохраняет герметичность.

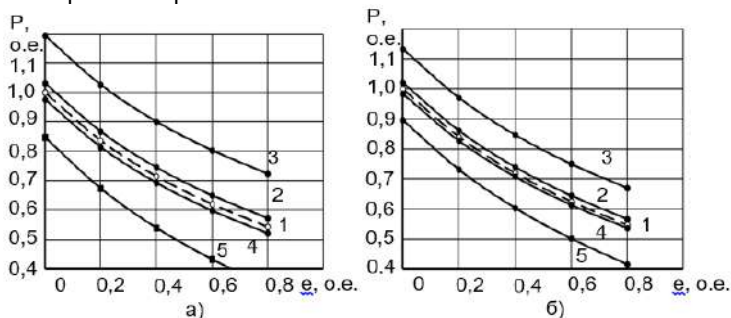


Рис. 3. Изменение давления от относительного эксцентриситета.

а – индукция 0,8 Тл, б – индукция 1,2 Тл. Зазор 0,5 мм. 1 – $v = 0$ м/с, 2 – $v = 10$ м/с, зубец на валу, 3 – $v = 25$ м/с, зубец на валу, 4 – $v = 10$ м/с, зубец на полюсе, 5 – $v = 25$ м/с, зубец на полюсе

Из полученных результатов следует, что МЖГ остается работоспособным при эксцентриситете до 80% от величины рабочего зазора. Полученные безразмерные зависимости могут применяться при проектировании МЖГ при этом обладая достаточной для инженерных расчетов точностью. Для работы в условиях значительного допуска на не соосности, а также работы на оборотах 3000 об/мин и выше возможно использование МЖГ с увеличенными рабочим зазором, и величиной магнитной индукции, за счет использования современных высококоэрцитивных магнитов уменьшая тем самым величину относительного эксцентриситета, и уменьшения скорости смещения отдельных слоев МЖ относительно друг друга.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, <https://rscf.ru/project/22-79-00156/>

Литература

1. Нестеров С.А. Effect of Motor Shaft Eccentricity on the Performance of High-Speed Magnetic Fluid Sealer / Нестеров С.А., Бакланов В.Д. // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE, Problems of the Regional Energetics. 2024. №1(61). – P. 26-33. DOI 10.52254/1857-0070.2024.1-61.03.

2. Морозов Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. // Иваново, 2011. 264 с.

УДК 621.333.8

Ю.В. ЗУБКОВ, д.т.н.,
А.Н. ГАЛОЧКИН, аспирант

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
e-mail: zub577@mail.ru; galoc11111@gmail.com

Анализ конструкций электромеханического вариатора гибридной силовой установки

Аннотация. В статье рассмотрены принцип работы и особенности устройства вариатора, оценены преимущества и недостатки различных конструктивных решений привода, проведен анализ энергообмена между элементами системы.

Ключевые слова: электромеханический вариатор, гибридная силовая установка автомобиля.

Yu.V. ZUBKOV, Doctor of Engineering,
A.N. GALOCHKIN, postgraduate

Samara State Technical University
443100, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: zub577@mail.ru; galoc11111@gmail.com

Analysis of the design electromechanical variator hybrid power plant

Abstract. The paper examines the operating principle and design features of the variator, evaluates the advantages and disadvantages of various drive design solutions, and analyzes the energy exchange between system elements.

Key words: electromechanical variator, the car hybrid power plant.

Трансмиссия играет важнейшую роль в повышении эффективности использования энергии, снижении расхода топлива и улучшении динамики транспортных средств. Бесступенчатые трансмиссии, такие как электромеханические вариаторы (ЭМВ), позволяют плавно изменять передаточное отношение.

ЭМВ управляет соотношением механических моментов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и тягового электрического двигателя (ТЭД). В большинстве конструкций ЭМВ используются механические передачи, управляемый блок сцепления, обгонная муфта и электрическая машина. ЭМВ взаимодействует с ДВС, оптимизируя использование мощности и крутящего момента. Например, при низкой скорости автомобиля основную нагрузку берет на себя ТЭД, а с ростом скорости подключается ДВС. При торможении ТЭД используется для рекуперации энергии, увеличивая энергосбережение и общий КПД силовой установки.

Гибридная силовая установка с планетарным редуктором [1] показана на рис. 1.

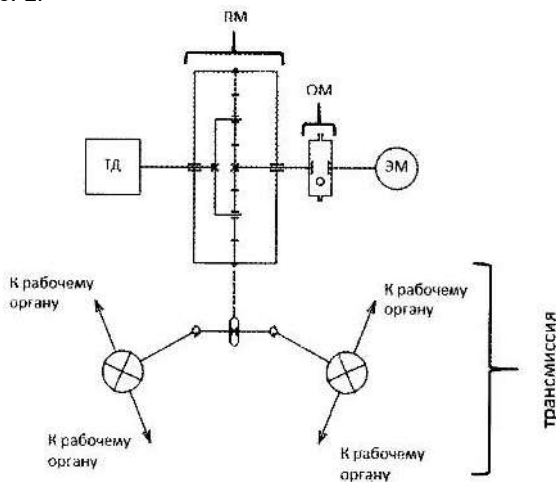


Рис. 1. Гибридная силовая установка с планетарным редуктором

Эта система объединяет тепловой двигатель, две электрические машины и планетарный механизм, что позволяет эффективно распределять потоки мощности между агрегатами. Тепловой двигатель соединен с водилом планетарного механизма, а электрические машины

подключены к солнечной и коронной шестерням. Управление потоками энергии осуществляется через обгонную и фрикционные муфты, что обеспечивает возможность работы в двигательном, генераторном режимах и рекуперации энергии. Максимальное передаточное отношение между водилом и коронной шестерней позволяет использовать электродвигатель пониженной мощности, что особенно важно для увеличения пробега транспортного средства на электротяге.

Еще одним интересным решением является гибридная трансмиссия, описанная в [2], которая включает два планетарных ряда и два электродвигателя. Автоматическое управление передаточным числом делает систему универсальной, позволяя работать в двигательном, генераторном и комбинированном режимах. Компактность конструкции и высокая эффективность делают данное решение привлекательным для использования в гибридных автомобилях и транспортных средствах. К недостаткам можно отнести сложность механической части и повышенные требования к системе охлаждения из-за значительных тепловых нагрузок.

Переходя к безредукторным электромеханическим вариаторам, стоит отметить их уникальные особенности, отличающие их от систем с планетарными редукторами. В [3] предложено устройство, выполненное в виде двух соосно установленных индукторов с обмотками возбуждения и общим якорем (рис. 2).

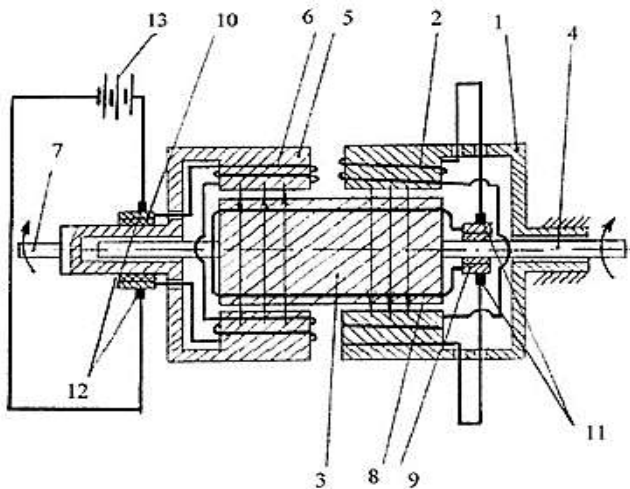


Рис. 2. Безредукторный вариатор

Магнитные потоки обоих индукторов создают противоположно направленные ЭДС в обмотке якоря, что позволяет менять направле-

ние вращения ведомого вала путем переключения питания обмоток возбуждения. Простота конструкции и надежность делают это решение подходящим для маломощных систем, таких как бытовые приводы и промышленные установки. Преимуществами данного варианта являются низкие механические потери и возможность работы в широком диапазоне скоростей. Однако ограниченная мощность и необходимость использования дополнительных источников питания для управления обмотками возбуждения могут стать ограничивающими факторами.

Проведенный анализ показывает, что выбор между устройствами с планетарными редукторами и безредукторными системами зависит от конкретных требований к системе.

Вариаторы с планетарными редукторами обеспечивают высокую гибкость управления потоками энергии и подходят для сложных гибридных систем, но сложность управления ограничивает их применение в маломощных установках. Безредукторные системы, напротив, предлагают разнообразие решений, они проще в обслуживании, но имеют ограничения по мощности и крутящему моменту. Таким образом, выбор конкретной конструкции зависит от таких требований к системе, как мощность, диапазон передаточных чисел, массогабаритные характеристики и стоимость. При этом важно учитывать не только технические параметры, но и экономические аспекты, чтобы обеспечить оптимальное соотношение эффективности и затрат.

Несмотря на некоторые недостатки, такие как сложность конструкции и высокая стоимость, исследования и разработки в этой области продолжаются. Эти системы становятся все более популярными в гибридных и электрических автомобилях, а их дальнейшее развитие способствует внедрению инноваций в электроавтомобилестроение.

Литература

1. Патент РФ 2629648, 31.08.2018.
2. Патент US 747908, 20.01.2009.
3. Патент РФ 2447569, 10.04.2012.
4. Петров А.П. Конструкция и проектирование гибридных автомобилей: учебное пособие / А.П. Петров. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2024. 168 с.

К 621.319

М.С. ВЕНЦЕРЕВ^{1,2}, аспирант
П.А. ДЕРГАЧЕВ², к.т.н, доцент
М.Д. НЕПЕИН¹, инженер-конструктор 2 категории

¹АО «Научно-исследовательский инженерный институт»
143912, МО, г. Балашиха, Западная промзона, ул. шоссе Энтузиастов, д. 6

²Московский энергетический институт
111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 17
E-mail: VentserevMS@mpei.ru

Численное моделирование влияния конструктивных элементов на характеристики антенны на базе пьезоэлектрического преобразователя

Аннотация. В данной работе предложен способ оценки степени изменения характеристик гидроакустической антенны на базе пьезоэлектрического преобразователя в зависимости от наличия дополнительных конструктивных элементов. Данный способ может быть полезен при проектировании различных устройств, основанных на использовании пьезоэффекта.

Ключевые слова: численное моделирование, пьезоэффект, пьезоэлектрический преобразователь

M.S. VENTSEREV^{1,2}, graduate student
P.A. DERGACHEV², PhD in technical science
M.D. NEPEIN¹, engineer of the 2nd category

¹JSC «Research Engineering Institute»
143912, Moscow reg., Balashikha, Western industrial zone, Enthusiastov highway, 6.

²Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokasarmennaya street, 17
E-mail: VentserevMS@mpei.ru

Numerical modeling of the influence of structural elements on the characteristics of antenna based on piezoelectric transducer

Abstract. In this paper we propose a method for estimating the degree of change in the characteristics of a hydroacoustic antenna based on piezoelectric transducer depending on the presence of additional structural parts. This method can be useful in the design of various devices based on the use of the piezo effect.

Key words: numerical modeling, piezo effect, piezoelectric transducer

Пьезоэлектрические преобразователи широко используются в гидроакустике для осуществления гидролокации, сейсморазведки, подводной связи, исследования профилей течений и т.д. Подобные устройства являются гидроакустическими антеннами, излучающими либо прини-

мающими волны акустического давления в толще воды. Для создания колебаний используется активный элемент из пьезоматериала (обычно это пьезокерамика), вид которого зависит от конкретного назначения устройства и может представлять собой кольцо, сферу, набор параллельно соединенных пластин и т.д. (рис. 1). Пьезоэффект – это физическое явление, заключающееся в возникновении электрического напряжения на границах образца материала вследствие его деформации. Данный эффект является обратимым, т.е. приложение электрического напряжения на границы влечет за собой возникновение деформации. Таким образом, пьезоэффект является разновидностью электромеханического преобразования энергии.

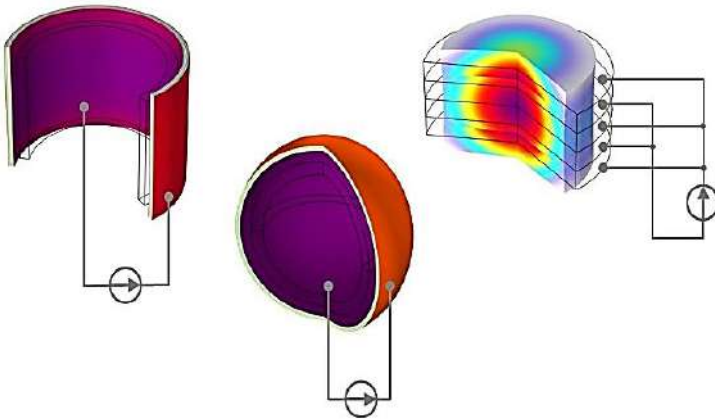


Рис.1. Некоторые виды активных элементов пьезопреобразователей

Расчет преобразователя осложняется рядом факторов, таких, как анизотропия свойств пьезоэлектрического материала и мультифизичность процесса. Существуют инженерные методики для расчета преобразователей, основанные на использовании схем замещения с интегральными параметрами. Однако в ряде случаев необходимо учитывать влияние конструктивных элементов, что не удастся сделать данными методиками. Для оценки такого влияния можно использовать расчет методом конечных элементов, позволяющий в явном виде получить распределение физических полей. В качестве примера рассмотрим влияние близости корпуса ($\varnothing 400$ мм, высота 100 мм) на характеристики подвешенной к нему цилиндрической антенны ($\varnothing 60$ мм, высота 50 мм) в режиме излучения. Картина акустического давления представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, корпус оказывает влияние на процесс излучения волн, что выражается в искажении диаграммы направленно-

сти (рис. 3). При расстоянии 200 мм диаграмма направленности имеет практически неискаженный вид.

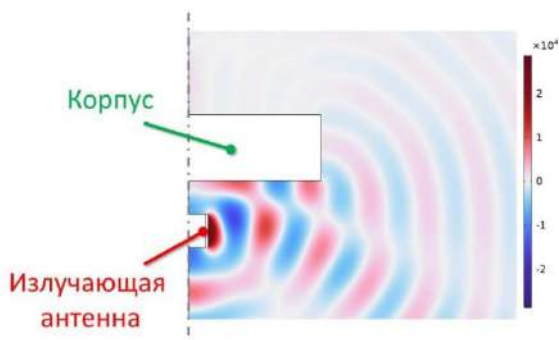


Рис. 2. Картина поля акустического давления p , Па

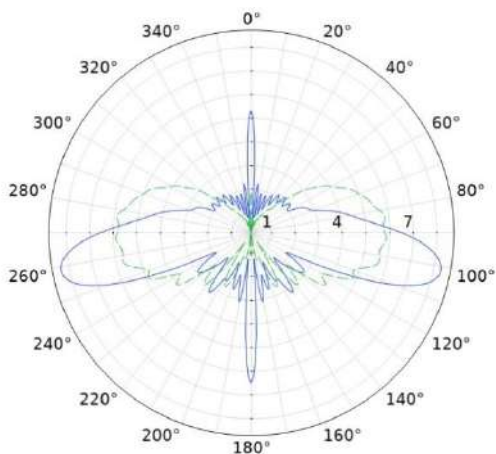


Рис. 3. Диаграмма направленности преобразователя при расстоянии от корпуса до антенны 0 мм (сплошная линия) и 200 мм (прерывистая линия)

Вывод. Предварительная оценка данного влияния поможет подобрать правильную геометрию на этапе проектирования и сократить объем испытаний.

СЕКЦИЯ 11.

ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 539.51

МАСЛОВ Л.Б., д.ф.-м.н.
ИЛЫИНА Е.Э., аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, улица Рабфаковская, 34
E-mail: leonid-maslov@mail.ru

Создание решетчатых структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей для проектирования пористых скаффолдов

Аннотация. В работе приведены результаты создания пористых структур на основе различных трижды периодических минимальных поверхностей и прогнозы их использования при проектировании имплантатов, используемых в медицине для восстановления сегментарных костных переломов.

Ключевые слова: трижды периодические минимальные поверхности, пористый скаффолд, регенерация костной ткани.

MASLOV L.B., Doctor of Physical and Mathematical Sciences
ILYINA E.E., Postgraduate

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya Street, 34
E-mail: leonid-maslov@mail.ru

Creation of lattice structures based on triply periodic minimal surfaces for designing porous scaffolds

Abstract. The paper presents the results of creating porous structures based on various triply periodic minimal surfaces and predictions of their use in the design of implants used in medicine for the restoration of segmental bone fractures.

Key words: triply periodic minimal surfaces, porous scaffold, bone tissue regeneration.

Практически каждая область современной науки связана с материалами, имеющими в своём строении пористые структуры, обладающие специфическими физико-механическими свойствами. В основном, пористые тела разделяются на следующие категории:

- с регулярными пористыми структурами, в которых наблюдается правильное чередование пор и соединяющих их каналов;
- со стохастическими структурами, в которых форма, размеры, ориентация, взаимное расположение и взаимосвязи пор случайны.

Долгое время с помощью аддитивных технологий велось искусственное создание пористых структур с помощью метаматериалов, обладающих нетривиальными физическими свойствами. Среди метаматериалов, в свою очередь, особый интерес вызывают метабиоматериалы. Это конструкционные биоматериалы, беспрецедентные свойства которых происходят от их геометрической конструкции в разных (обычно меньших) масштабах длины. Большую роль эта концепция сыграла в медицине при изучении процессов регенерации костной ткани в объеме пористых имплантатов (скаффолдов). Данные материалы применялись для создания ортопедических биоматериалов, конечной целью которых было улучшение эффективности регенерации костной ткани в пористом объеме и снижение риска инфекций, связанных с вживлением скаффолдов. [1]

Метабиоматериалы, применяемые в тканевой инженерии при создании имплантатов, в первую очередь должны удовлетворять двум основным требованиям – искусная имитация структур замещаемой биологической ткани и обеспечение необходимых механических свойств замещающего скаффолда.

Главной сложностью является имитация структуры кости. Для более успешного процесса регенерации костной ткани в имплантате нужно соблюдать изменение биологических и физико-механических характеристик внутри кости при переходе от одного типа ткани к другому (рис.1). [2] При постановке задачи разработки решетчатых структур основными принимаются следующие морфометрические характеристики скаффолда:

- взаимосвязанность, размер, кривизна и форма пор;
- объем пористости;
- удельная площадь поверхности.

Регулярные пористые структуры обладают легко контролируемыми характеристиками геометрии, но при этом далеки от естественной структуры биологической ткани. Стохастические же структуры, более детально описывают структуру ткани, но практически не поддаются контролю характеристик. Поэтому актуальной целью является создание пористых структур, обладающих более сложными законами порового заполнения объема тела, при этом имеющие доступные инструменты для контроля геометрии структуры.

Стремясь создать пористую структуру, изменением морфометрических характеристик которой можно было бы управлять, инженеры пришли к методам проектирования геометрии на основе трижды периодических минимальных поверхностей (triply periodic minimal surfaces – TPMS), основанных на скелетных схемах кристаллографических решеток [3].

Такие поверхности разбивают трехмерное пространство на системы непересекающихся поверхностей, а также обладают в каждой точке нулевой средней кривизной, то есть характеризуются минимальной энергией поверхностного натяжения.

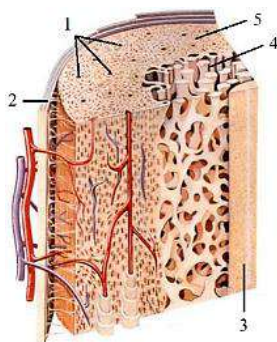


Рис. 1. Основные типы тканей, выделяемые в структуре кости:

1 – Гаверсовы каналы, 2 – надкостница (периост), 3 – желтый костный мозг, 4 – губчатое вещество кости, 5 – компактный слой кости

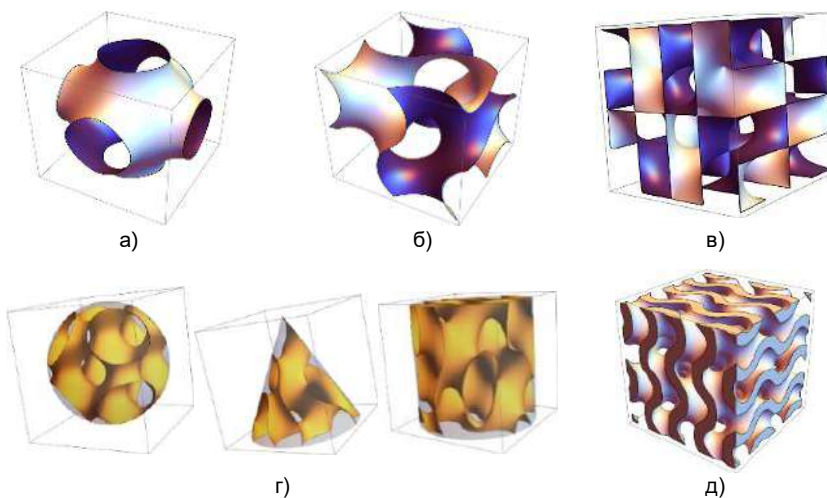


Рис. 2. Элементы, созданные с помощью поверхностей:

а – P-TPMS; б – G-TPMS; в – G_{VAR} -TPMS; г – примеры форм пористых тел, заполненных различными TPMS; д – скаффолд с пористостью 50%

Для разработки моделей пористых скаффолдов в данном исследовании в программе WolframMathematica по известным математическим уравнениям (1-3) были нарисованы примитивная (P, рис. 2,а), гироидная (G, рис. 2,б) и вариация гироидной (G_{VAR} , рис. 2,в) поверхности:

$$P = \cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0 \quad (1)$$

$$G = \sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x) = 0 \quad (2)$$

$$G_{VAR} = \sin(2x) \cos(y) \sin(z) + \sin(2y) \cos(z) \sin(x) + \sin(2z) \cos(x) \sin(y) = 0 \quad (3)$$

На основе выбранных поверхностей создаются 3D-модели пористых скаффолдов. Они могут иметь разную форму (рис. 2,г) и различный объем пористости (рис. 2,д). Дальнейший анализ с помощью конечно-элементного моделирования позволяет оценить соответствие морфологического строения скаффолда биологическим параметрам костной ткани, а также дает представление о том, как тип элементарной ячейки и параметры структуры отразятся на процессе регенерации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20118, <https://rscf.ru/project/25-21-20118/>

Литература

1. Zadpoor A.A. Meta-biomaterials // Biomaterials science. 2020.V. 8. №1. p.18-38.
2. Ступко М. Гидроксилapatит – самый главный из фосфатов кальция [Электронный ресурс] // «БИО/МОЛ/ТЕКСТ-2013». URL: <https://biomolecula.ru/articles/gidroksilapatit-samyi-glavnyi-iz-fosfatov-kaltsiia>
3. Schoen A.H. Triply-periodic minimal surface by Alan H. Schoen: [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://schoengeometry.com/e-tpms.html>

УДК 621.313.3

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. Рабфаковская, 34
E-mail: kolobov_ab@mail.ru

Основы технической реализации предиктивной аналитики роторных машин

Аннотация. Рассмотрена техническая реализация предиктивной аналитики на основе средств периодического вибрационного мониторинга механизмов собственных нужд для организации управления их эксплуатацией по фактическому и прогнозируемому техническому состоянию.

Ключевые слова: предиктивная аналитика, вибрационный мониторинг и диагностика, техническое состояние, дефекты.

A.B. KOLOBOV Candidate of Engineering, docent,
F.B. OGURTSOV, Candidate of Engineering, docent

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

Fundamentals of technical realization predictive analytics of rotor machines

Abstract. Eechnical implementation of predictive analytics based on means of periodic vibration monitoring of auxiliary mechanisms for organization of their operation control by actual and predicted technical condition is considered.

Key words: predictive analytics, vibration monitoring and diagnostics, technical condition, defects.

Представлены основные положения реализации структуры «off-line» вибромониторинга, актуальной для электромеханических роторных агрегатов системы собственных нужд ТЭС и АЭС, а также предприятий тепловых сетей и промышленных предприятий различных отраслей.

В методической компоненте предиктивной аналитики (ПА) основой являются адаптивные цифровые двойники (АЦД), моделирующие изменение скорости ухудшения диагностических признаков от типа возникшего дефекта и особенностей конструкции машин [1].

Вся информация о техническом состоянии сконцентрирована в АРМ управления эксплуатацией машин (АРМ УЭМ). Обобщенная структура АРМ УЭМ приведена на рис. 1.

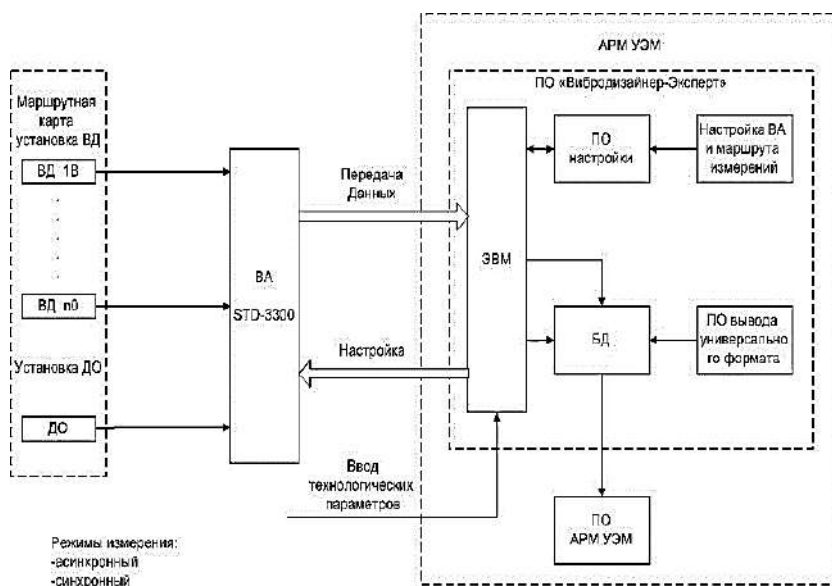


Рис. 1. Обобщенная структура АРМ УЭМ:

ВД in – вибрационные датчики, устанавливаемые в кочках контроля согласно маршрутной карты измерений; ДО – датчик оборотов, устанавливаемый при измерении синхронных спектров; ВА – вибронализатор STD-3300;

БД – база данных измеренных вибропараметров в структуре

ПО «Вибродизайнер-Эксперт»

Исходя из имеющихся возможностей предложен вариант реализации на основе 2-х канального мобильного виброанализатора сигналов STD-3300 и программного обеспечения (ПО) для ведения базы данных «Вибродизайнер-Эксперт».

ПО АРМ УЭМ должно решать три основные задачи ПА:

- оперативное определение текущего технического состояния (ТС) на основе алгоритмов мониторинга (параметрической диагностики);
- выявление методами экспертной диагностики дефекта или совокупности дефектов, которые привели / могут привести к изменению ТС;
- прогнозная диагностика развития дефектов с рекомендациями по организации техобслуживания и ремонтов (ТО и Р).

Основные модели, реализуемые в АЦД УЭМ, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные модели, реализуемые в АЦД УЭМ

Модель	Этап использования
Статистическая модель установки индивидуальных границ зон ТС и ограничительных уровней	Определение текущего ТС (параметрическая диагностика)
Статистическая модель диагностики по отклонению от контурной характеристики распределения (КХР) общей вибрации	Экспертная диагностика (2 уровень)
Статистическая модель распознавания на основе метрических методов по асинхронным и синхронным прямым спектрам и спектрам огибающей	Экспертная диагностика (2 уровень)
Вероятностно-статистическая модель распознавания для установления порогов классификатора Байеса, модель классификатора Байеса	Экспертная диагностика (3 уровень)
Физические модели (например, модели износа контактных звеньев, кинематических пар и др.) для корректировки статистических моделей деградации деталей и узлов	Используются как дополнения к экспертной диагностике (2 – 3 уровней)
Регрессионные модели по трендам вибрации общего уровня Точечная модель по тренду пик-фактора	Прогнозная диагностика (3 уровень)
Регрессионные модели по трендам частотных компонент спектров: • в полосах информативных частот • модуляционных характеристик в зоне информативных частот дефектов	Прогнозная диагностика (3 уровень)

ПО АРМ УЭМ должно решать задачи ПА нескольких уровней:

- первый – оперативное определение текущего ТС на основе алгоритмов параметрической диагностики, задающее реализацию всех последующих процедур;
- второй уровень – экспертная диагностика, проводимая на основе результатов оценки текущего ТС параметрической диагностикой, которая должна формировать целевую функцию ПА;
- третий уровень – прогнозная диагностика, проводимая на основе результатов как параметрической, так и экспертной диагностики, формирующая и корректирующая целевую функцию ПА, выдающая рекомендации по ТО и Р.

Литература

1. Колобов А.Б. Предииктивная аналитика роторных машин ТЭС на основе непрерывного и периодического вибрационного мониторинга / А.Б. Колобов, Ф.Б. Огурцов // Материалы Междунар. науч.-технич. конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXII Бенардосовские чтения): том III Электротехника. Иваново: ФГБОУВО Ивановский государственный энергетический университет, 2023, с. 284–287.

УДК 621.565.93/.95

М.А. НОЗДРИН, к.т.н,
А.А. МИХАЙЛИШИНА, студент

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

Моделирование конструкции динамического теплообменного аппарата

Аннотация. Конструкция теплообменного аппарата разработана методом конечных объемов. Проведены расчеты на колебания, гидродинамический анализ.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, гидродинамический анализ, утилизация тепла.

М.А. NOZDRIN, Ph.D.,
А.А. MIKHAILISHINA, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: kochetova_an_a@mail.ru

Simulation of the design of a dynamic heat exchanger

Abstracts. The design of the heat exchanger was developed using the finite volume method. Calculations for vibrations and hydrodynamic analysis are carried out.

Key words: heat exchanger, hydrodynamic analysis, heat recovery.

На основе расчета методом конечных объемов спроектирована модель (рис.1), техническое обслуживание для очистки которой практически не требуется, имеющая четыре вертикальные панели. Модель 3D реализуется в программном комплексе SOLIDWORKS.

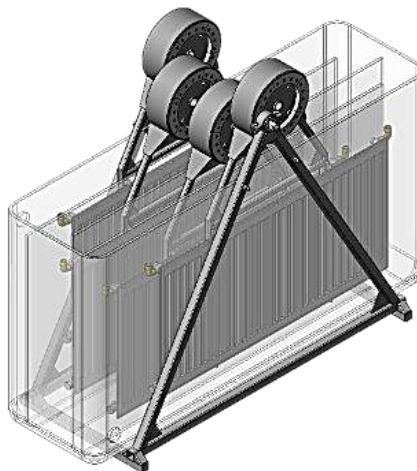


Рис. 1. Модель теплообменного аппарата

Качение кронштейнов с теплообменными панелями происходит на колесе со смещенным центром. Вал устанавливается на две опоры (подшипники скольжения). На нем размещены колеса при помощи шпоночного соединения. Колесо имеет обод из материала с низким коэффициентом трения (фторопласт). За пределами опор расположено зубчатое колесо, за счет которого вал приводится в движение с помощью зубчато-ременной передачи [1]. Конструкция содержит двигатель и полимерную ванну.

Расчет на колебания для рамы проводится в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation.

Характер закрепления: две регулируемые опоры рамы закрепляем по трем осям (2 шарнира), две другие опоры фиксируем по вертикальной оси. Контактный элемент расположен на валу (подшипник).

Расстояние между опорами $l_1 = 510$ мм.

Высота конструкции $l_2 = 1225$ мм.

Материал конструктивных элементов – Ст3 с пределом текучести $\sigma_T = 245$ МПа.

Коэффициент запаса примем $n_T = 1,2$, допускаемое напряжение $[\sigma] = 204$ МПа.

Составляется сетка конечных элементов со следующими характе-

ристиками: максимальный размер элемента 16 мм, минимальный 3,2 мм, минимальное количество элементов в окружности 8, плоские детали (косынки) 10 мм, соотношение увеличения размера элемента 1,2. Количество элементов 525818.

Результаты расчетов показали, что первая собственная частота рамы составила $\nu = 20,57$ Гц (рис. 2), что удовлетворяет требованию (не больше допускаемой $[\nu] = 20$ Гц).

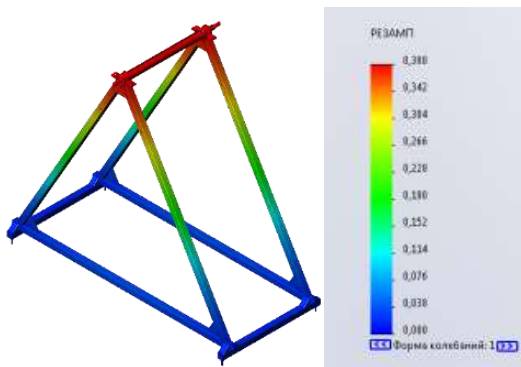


Рис. 2. Эпюра амплитуд перемещений для первой формы колебаний

Гидродинамический анализ реализуется в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation.

Заданы начальные температуры холодного и горячего теплоносителей ($t_{\text{хол}}$, $t_{\text{гор}}$), давления ($p_{\text{хол}}$, $p_{\text{гор}}$), расходы ($v_{\text{хол}}$, $v_{\text{гор}}$), скорость движения панелей ($v_{\text{пан}}$): $t_{\text{хол}} = 20$ °C; $t_{\text{гор}} = 95$ °C; $p_{\text{хол}} = 2$ атм; $p_{\text{гор}} = 1$ атм; $v_{\text{хол}} = 2$ м³/ч; $v_{\text{гор}} = 2$ м³/ч; $v_{\text{пан}} = 0,3$ м/с.

Выделены две подобласти течения. Первая представляет из себя объём, в котором движется холодный теплоноситель, вторая – горячий. Контакт этих подобластей является границей теплообмена.

Сгенерирована конечно-элементная гексагональная сетка.

Проведены гидродинамические расчеты конструкции - различных схем соединения панелей, режимов течения жидкостей и характера подключения пластин. В результате расчетов оптимизирована конструкция теплообменного аппарата методом конечных объёмов - четыре вертикальные подвижные пластины, параллельно попарно соединенные в режиме противотока с максимальным перепадом температур для холодной воды 34,4 градуса и для горячей воды 54,3 градуса (рис. 3).

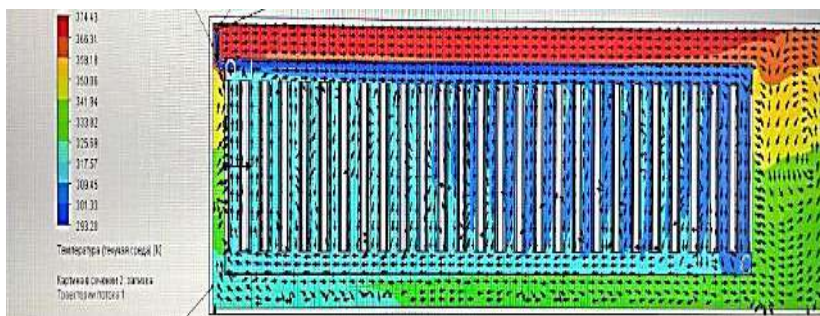


Рис. 3. Распределение температур в сечении в направлении потока

Разработан пакет чертежей для изготовления модели конструкции. Предлагаемый теплообменный аппарат, способный обрабатывать загрязненные жидкости благодаря подвижным элементам, позволит сэкономить 50,4 Гкал энергии в месяц, что в денежном эквиваленте составит 1620,5 тыс. руб. в год [2], при минимальных затратах на изготовление и эксплуатацию.

Литература

1. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин: учебное пособие / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов: под ред. О.А. Ряховского. 13-е изд., испр. и доп. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 564 с.: ил.
2. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения: справочник: в 2-х кн. / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; ред. В.Г. Лисиенко. М.: Теплоэнергетик, 2003.

УДК 624.042.12

М.А. НОЗДРИН, к.т.н,
А.Р. ТИХОМИРОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
15303 г. Иваново, Рабфаковская, 34
E-mail: tosha.tikhomirov.0101@mail.ru

Математическое моделирование болтовых соединений авиационных конструкций

Аннотация. Приведены результаты расчета конструкционного элемента, содержащего болтовое соединение авиационных пластин.

Ключевые слова: болтовое соединение, авиационные пластины.

M.A NOZDRIN, Candidate of Engineering,
A.R. TIKHOMIROV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: tosha.tikhomirov.0101@mail.ru

Mathematical modeling of bolted connections of aircraft structures

Abstracts. The results of the calculation of a structural element a bolted connection of aircraft plates are presented.

Key words: bolted connection, aircraft plates.

Болтовое соединение является важной частью конструкции авиационных аппаратов. В частности, они используются в установке кресел пилотов.

Работа содержит решение задачи моделирования болтового соединения авиационных пластин. Рассматриваемое соединение используется в установке кресел пилотов. Установка кресел пилотов – это сложный инженерный процесс, направленный на обеспечение безопасности, комфорта и эффективности работы экипажа. Кресла устанавливаются на полу самолета с помощью специальных высокопрочных креплений, способных выдержать значительные перегрузки при взлете, посадке и турбулентности [1].

Модель соединения состоит из двух алюминиевых пластин (рис.1).

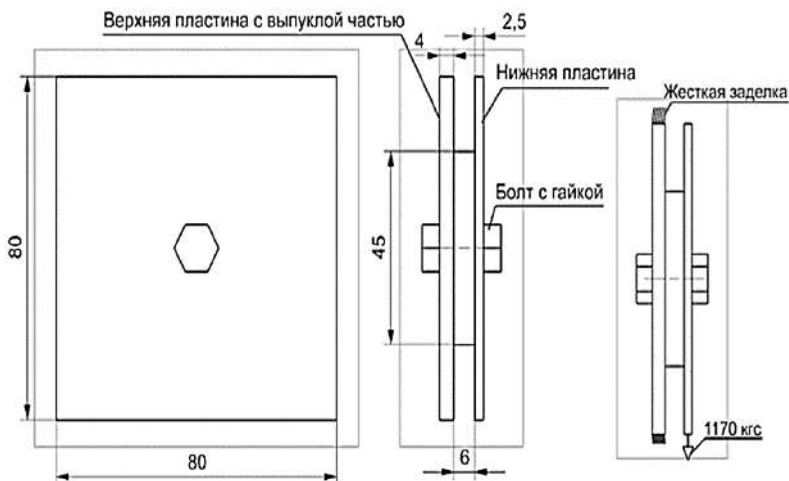


Рис. 1. Расчетная схема соединения пластин

Одна пластина содержит прямоугольную (размеры 80 мм x 80 мм x 4 мм) и круглую выпуклую части (диаметр 45 мм, толщина 6 мм). У второй пластины размеры 80 мм x 80 мм x 2.5 мм. Пластины соединены титановым болтом с гайкой (диаметр болта 5 мм, длина 22,5 мм).

Для дальнейшего задания материалов пластины из алюминия, болт с гайкой из титана, необходимо создать разные коллекторы [2] для пластин и болта с гайкой (табл.1).

Таблица 1. Характеристика материалов модели

Материал	Модуль Юнга (E)	Коэффициент Пуассона (NU)	Предел текучести	Плотность (РНО)
Aluminum_2014	72000 МПа	0.33	217 МПа	2.66e-06kg/mm³
BT16	109870 МПа	0.3	170 МПа	4680 m³

После задания материала создается расчетная модель, в которую входят контакт, нагрузки и ограничения. Контакт присутствует между головкой болта и верхней пластиной, между верхней пластиной и нижней, между «ножкой» болта и пластинами, между нижней пластиной и гайкой. Коэффициент трения принимается 0,15. Между гайкой и болтом действует жесткая склейка. Затяжкой болта пренебрегаем.

Приведем анализ результатов расчетов болта (рис. 2, 3).

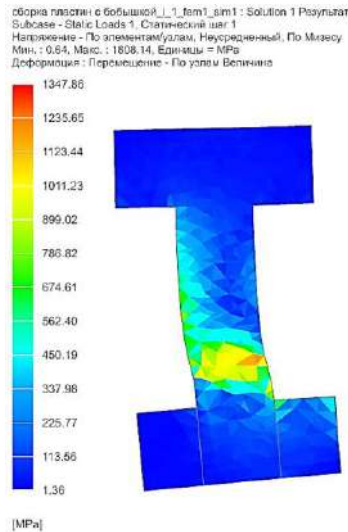


Рис. 2. Напряжение в болте в разрезе (МПа)

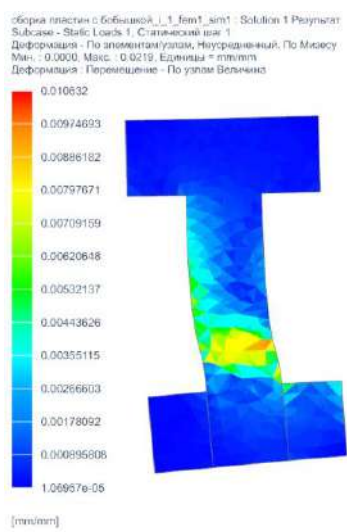


Рис. 3. Деформация болта в разрезе

Как видно из рисунков, максимальные значения напряжений равны 1347 Мпа, деформаций 0,0106. Таким образом решена задача моделирования соединения авиационных пластин. Расчетные данные удовлетворяют требованиям, поставленным в задании заказчика.

Литература

1. Технология самолетостроения / А.Л. Абибов, В.П. Григорьев. М.: Машиностроение, 1970. 598 с.
2. NX Nastran User's Guide. 2011.

СЕКЦИЯ 13

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.002.076

Н.Л. ПАВЛЮКОВА, к.т.н., доцент

М.Ю. ВОЛКОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: margaret_wolf@mail.ru, np@stmd.ru

К вопросу изучения основ компьютерной инженерии студентами профиля «Технология машиностроения»

Аннотация. Рассматриваются особенности преподавания основ компьютерной инженерии. Приведены виды занятий и примеры работ, которые позволяют студентам с разным уровнем подготовки освоить приемы трехмерного моделирования на уровне, который требует работодатель от современного выпускника.

Ключевые слова: инженерия, трехмерное моделирование, трехмерная печать, электронная модель изделия, междисциплинарные связи, проектная деятельность.

M.Y. VOLKOVA, Candidate of Engineering, associate professor

N.L. PAVLYUKOVA, Candidate of Engineering, associate professor

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34

E-mail: margaret_wolf@mail.ru, np@stmd.ru

On the issue of studying the basics of computer engineering by students of the profile «Technology of Mechanical Engineering»

Abstract. The features of teaching the basics of computer engineering are considered. The types of classes and examples of jobs that allow students with different levels of training to master the techniques of three-dimensional modeling at the level that an employer requires from a modern graduate are given.

Key words: engineering, three-dimensional modeling, three-dimensional printing, electronic product model, interdisciplinary communication, project activities.

Дисциплина «Основы компьютерной инженерии» изучается студентами направления 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств профиля «Технология машиностроения» на 2 курсе. Основой для изучения являются такие дисциплины 1 и 2 курса, как «Инженерная и компьютерная графика», «Ком-

пьютерное моделирование объектов профессиональной деятельности», «Машиностроительное черчение».

Само понятие «инженерия» дано в ГОСТ Р 57306-2016 «Инжиниринг. Терминология и основные понятия в области инжиниринга». В нем описывается содержание инженерии, как проектирование, конструирование, расчетно-графические работы, в отличие от понятия «инжиниринг», которое имеет более широкое значение и охватывает все этапы жизненного цикла изделия, связано с реализацией замысла конструктора [2].

Особенностью преподавания дисциплины является разный уровень подготовки студентов, большое количество графических программ, высокие требования рынка труда к подготовке специалистов. Для освоения материала в полном объеме на высоком уровне позволяет не только лекционный материал, но и практические занятия, лабораторные работы, самостоятельная работа.

На лабораторных работах студенты проектируют трехмерные модели деталей (вал, цилиндрическое и коническое зубчатое колесо, корпус), выполняют сборку, сборку с вырезом четверти, разнесенную сборку и ассоциативный сборочный чертеж [3, 4]. Одна из лабораторных работ посвящена освоению программы для подготовки цифровой модели к трехмерной печати (рис. 1) и печать деталей на 3-D принтере.

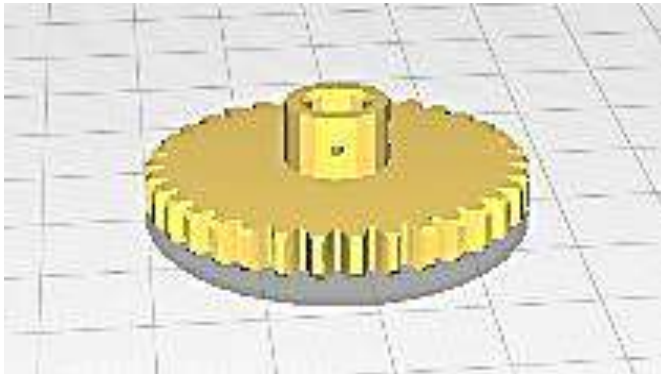


Рис. 1. Цифровая модель зубчатого колеса

Также студенты создают электронную модель изделия (рис. 2) по ГОСТ 2.052-2021 «Электронная модель изделия», в которой отражаются не только геометрические характеристики, но свойства, необходимые для изготовления, контроля, приёмки, сборки, эксплуатации, ремонта и утилизации изделия [1].

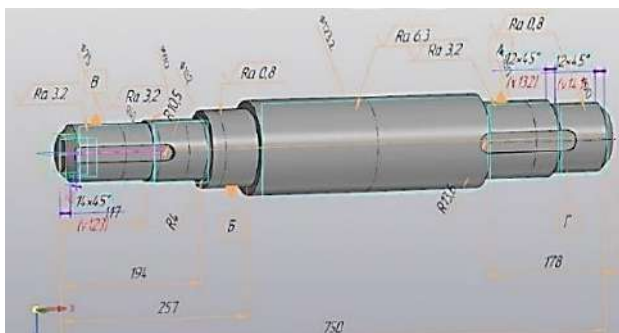


Рис. 2. Электронная модель вала

В рамках самостоятельной работы студенты выполняют проект, осваивая приемы трехмерного моделирования более сложных изделий, таких как коробка скоростей или редуктор (рис. 3), проектирование двумерных чертежей которых было выполнено ранее на дисциплине «Компьютерное моделирование объектов профессиональной деятельности». Такой подход позволяет применить полученные знания на практике, совершенствовать навыки трехмерного моделирования. В дальнейшем трехмерные модели деталей и сборки используются для проектирования технологической оснастки, разработки технологии изготовления деталей, технологии сборки и т.п. Таким образом реализуется проектная методика и методика сквозного проектирования при преподавании дисциплины. Над сложными проектами, состоящими из большого количества деталей, допускается работа группами. Наиболее интересные и проработанные проекты участвуют в конкурсе по трехмерному моделированию, который ежегодно организуется кафедрой «Конструирования и графики» ИГЭУ.

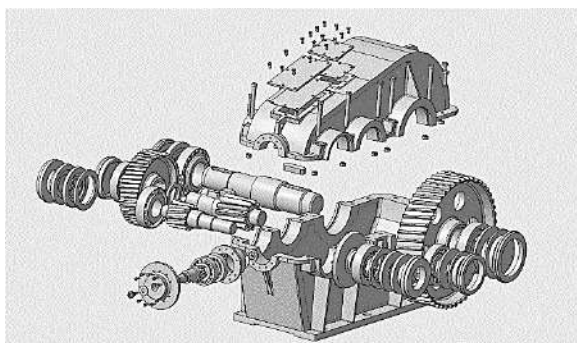


Рис. 3. Трехмерная модель редуктора. Разнесенная сборка

В программу дисциплины планируется включить изучение программ по созданию виртуальной реальности и программ с искусственным интеллектом, которые помогают создавать цифровую среду и оптимизировать разработанные модели.

Вывод. Применение комбинации различных методик преподавания при освоении дисциплины «Основы компьютерной инженерии» позволяет студентам получить навыки владения современными графическими программами в объеме, который требует современная индустрия, в частности предприятия машиностроительной отрасли.

Литература

1. ГОСТ Р 2.052-2021. Электронная модель изделия. Общие положения. М., 2022. 16 с.
2. ГОСТ Р 57306-2016. Инжиниринг. Терминология и основные понятия в области инжиниринга. М., 2018. 15 с.
3. Бочков А.Л. Трехмерное моделирование в системе Компас-3D (практическое руководство). СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 80 с.
4. Павлюкова Н.Л. Применение компьютерных технологий 3-D моделирования в обучении инжинирингу машиностроительного производства/ Н.Л. Павлюкова, М.Ю. Волкова// Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 15 апреля 2021 г. Иваново: ФГБОУВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России». 2021. С. 329–332.

УДК 631.363.2

Н.Л. ПАВЛЮКОВА, к.т.н., доцент
А.А. КАПРИЛЬЯНЦ, студент

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

Патентные исследования и разработка конструкции машины для измельчения зерновых компонентов комбикорма

Аннотация. В работе представлены патентные исследования в области машин для измельчения компонентов комбикорма, описаны их достоинства и недостатки. Предложена конструкция машины, которая позволяет измельчать сырье различных размеров и перемешивать их, приведена трехмерная модель и кинематическая схема оборудования.

Ключевые слова: патентные исследования, машина для измельчения, трехмерная модель, кинематическая схема, ротор, шнек.

N.L. PAVLYUKOVA, Candidate of Engineering, associate professor
A.A. KAPRILYANS, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: np@stmd.ru

Patent research and design development of a machine for grinding grain feed components

Abstract. The paper presents patent research in the field of machines for grinding and mixing feed components, describes their advantages and disadvantages. The design of the machine is proposed, which allows grinding raw materials of various sizes and mixing them, and a three-dimensional model and kinematic scheme of the equipment are presented.

Key words: patent research, shredding machine, three-dimensional model, kinematic diagram, rotor, auger.

Производство комбикорма – это важнейшая часть индустриализации сельского хозяйства, которая играет ключевую роль в обеспечении животноводства качественными кормами. Комбикорм представляет собой сбалансированное сочетание различных ингредиентов, которые могут иметь различную твердость, вязкость, размеры. Готовый продукт может представлять из себя гранулы различной величины, брикеты или гомогенную смесь измельченных компонентов.

Процесс производства комбикорма начинается с тщательного подбора сырьевых компонентов. Основными ингредиентами комбикорма являются зерновые культуры (кукуруза, пшеница и т.п.), бобовые, жмых, минеральные добавки и др. Один из важнейших этапов при производстве комбикорма – это процесс измельчения и перемешивания компонентов. Для этого трудоемкого процесса чаще используют дисковые, молотковые или вальцовые дробилки [1]. Известна роторно-вакуумная дробилка [3], которую можно применять не только для измельчения злаковых и бобовых, но и сена, соломы, которая имеет корпус-улитку с ротором в виде звезды, на который установлены лопасти с функцией перемешивания и измельчения. В устройстве для измельчения кусковых компонентов комбикорма [4] перпендикулярно расположены верхняя и нижняя камеры измельчения, в верхней камере ротор с режущими ножами установлен горизонтально, а в нижней – вертикально, предусмотрена заслонка для регулирования степени измельчения. Устройство для дробления компонентов кормосмеси [2] имеет бункер из четырех отсеков с заслонками, которые позволяют дозировать сырье, поступающее в рабочую камеру с вертикальным валом, вращающим нож в виде прямоугольной пластины. У этих устройств можно выделить ряд недостатков, в частности недостаточная степень измельчения сырья, налипание сырья на корпус и ножи ротора, нет возможности

одновременно измельчать сырье с разными механическими характеристиками, а также низкая производительность оборудования.

На основе проведенных патентных исследований поставлена задача, разработать машину для измельчения и перемешивания компонентов комбикорма, которая обеспечивает современные требования к процессу измельчения. На рис. 1 представлена трехмерная модель и кинематическая схема проектируемой машины.

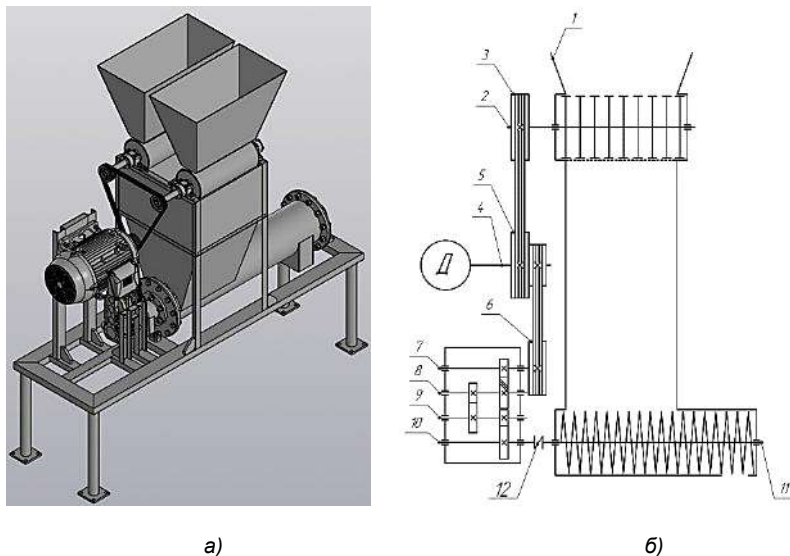


Рис. 1. Машина для измельчения и перемешивания компонентов комбикорма:
а – трехмерная модель; б – кинематическая схема

Машина состоит из двух бункеров 1, двух верхних роторов 2. И нижнего шнека 11. Электродвигатель 4 обеспечивает вращение роторов через шкивы 5 и 3, а также вращения шнека через редуктор ВКН 280 (7 – входная вал-шестерня, 8, 9 – промежуточные вал шестерни, 10 – выходной вал) и муфту 12.

Особенностью разработки является наличие двух бункеров, в которые через загрузочные патрубки поступает сырье двух видов (более крупного и более мелкого размеров). Основным рабочим органом машины являются два ротора на поверхности которых смонтированы чередующиеся ряды крыльчаток и бойков молотов (рис. 2, а). Роторы отличаются зазором между молотами и корпусом, что обеспечивает нужный размер компонентов комбикорма после измельчения. Перемолотые компоненты попадают в отсек со шнеком (рис. 2, б), в котором

они перемешиваются и транспортируются для контроля смеси и фасовки. Не перемолотые компоненты с помощью крыльчатки возвращаются на повторный цикл перемалывания.

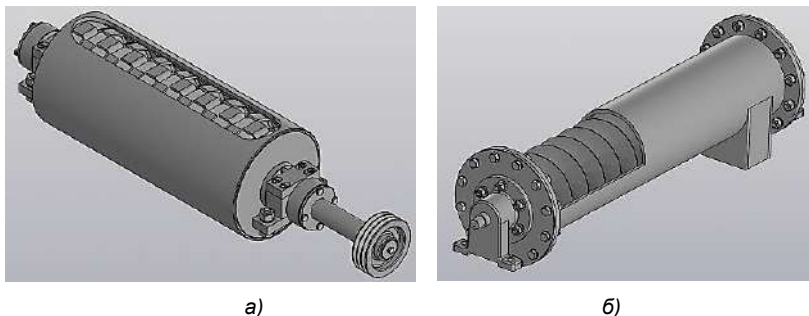


Рис. 2. Трехмерная модель рабочих органов машины:
а – ротор с крыльчатками и молотами; б – шнек

Вывод. Таким образом, предложенная конструкция машины позволяет измельчать сырье различных исходных размеров, позволяет получить заданный размер компонентов комбикорма, их перемешивание, обеспечивая высокую производительность.

Литература

1. Измельчение кормов: способы, виды машин [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://mtraktor.ru/blog/raboty-traktorom/izmelchenie-kormov/> (дата обращения: 05.04.2025).
2. Патент № 189600 РФ МПК В02С 9/02, А23К 40/00, А23Н 17/00. Устройство для дробления компонентов кормосмеси/ Чилингалян Н.О. заявл.: 2019.03.12. Опубл: 2019.05.28. Патентообладатели: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.
3. Патент № 2734327 РФ МПК В02С 13/00. Дробилка роторно-вакуумная/ Жвакин Д.Ю.- заявл: 2019.06.21. Опубл: 2020.10.15. Патентообладатели: Общество с ограниченной ответственностью «Компания АГРОСИСТЕМЫ».
4. Патент № 58948 РФ МПК В02С 13/04. Дробилка кормов/ Зиганшин Б.Г., Волков И.Е., Хайдаров Р.Р., Файзуллин И.Ф., заявл: 2005.03.09. опубл. 2006.12.10. Патентообладатели: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Казанская государственная сельскохозяйственная академия.

УДК 621.9.048.7:669.715

А.М. ВЛАСОВ, к.т.н., доцент
А.А. ЖУКОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003 г. Иваново, Рабфаковская, 34
E-mail: Zhukov.aleks@outlook.com

Влияние параметров лазерной обработки на свойства поверхностного слоя алюминиевых сплавов

Аннотация. В работе проанализировано влияние параметров лазерной обработки на свойства поверхностного слоя алюминиевых сплавов. Рассмотрены различные режимы обработки и их влияние на микроструктуру, твердость, коррозионную и износостойкость.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, лазерная обработка, поверхностный слой, микроструктура, твердость, коррозионная стойкость.

A.M. VLASOV, Ph.D., Associate Professor
A.A.ZHUKOV, graduate student,

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: Zhukov.aleks@outlook.com

Influence of laser processing parameters on the properties of the surface layer of aluminum alloys

Abstract. The paper analyzes the influence of laser processing parameters on the properties of the surface layer of aluminum alloys. Different processing modes and their influence on microstructure, hardness, corrosion and wear resistance are considered.

Key words: aluminum alloys, laser treatment, surface layer, microstructure, hardness, corrosion resistance.

Алюминиевые сплавы находят широкое применение в высокотехнологичных отраслях промышленности благодаря своей легкости, устойчивости к коррозии и высокой удельной прочности [1]. Однако для повышения их износостойкости, твердости и усталостной прочности требуется модификация поверхностного слоя. Активное использование алюминиевых сплавов обусловлено их низкой плотностью (при высокой прочности, выраженной отношением $R_m \text{ к } \rho$ [г/см^3]) а также развитием современных технологий, в том числе методов создания композитов на алюминиевой матрице. Улучшение свойств как объемного материала, так и поверхностных слоев позволяет значительно повысить износостойкость и термостойкость сплава.

Лазерная обработка алюминиевых сплавов превосходит традиционные методы обработки благодаря бесконтактности, точности, локальности и экономической эффективности. Наличие в матрице некоторых

легирующих элементов изменяет термическую стойкость металла при лазерной обработке [2-5]. Однако при резке могут возникать дефекты (прижоги, колебания ширины реза, налипание окалины), что особенно актуально для заготовок небольшой толщины.

Область исследования методов модификации поверхностного слоя алюминиевых сплавов динамично развивается в последние годы. Для лазерной термообработки применяют лазеры мощностью 0.5–10 кВт, обеспечивающие плотность мощности 104–105 Вт/см². При меньшей плотности происходит только нагрев, а при большей 104–106 Вт/см² – испарение материала. Эффект лазерного воздействия определяется температурой поверхности, временем воздействия и охлаждения, а также свойствами материала. Эти параметры зависят от типа лазера, характеристик луча (мощность, диаметр), скорости перемещения и т.д. Температура подповерхностных слоев пропорциональна плотности мощности луча и времени воздействия. Варьируя эти параметры, реализуют различные технологические процессы: поверхностную закалку и отпуск, лазерное текстурирование и плакирование, легирование, сварку, модификацию подповерхностных слоев, резку и долбление. Лазерная обработка алюминиевых сплавов осуществляется в режимах резки и легирования, как с плавлением, так и без плавления поверхностных слоев.

Лазерная обработка алюминиевых сплавов включает:

- Поверхностную закалку: лазер нагревает и быстро охлаждает поверхностный слой, формируя мелкозернистую структуру и повышая твердость.
- Лазерное легирование: включает в себя расплавление поверхностного слоя материала под воздействием лазерного луча с одновременным добавлением легирующих элементов. После затвердевания формируется сплав с измененным химическим составом и, следовательно, улучшенными свойствами, такими как твердость, износостойкость и коррозионная стойкость [6].
- Лазерное текстурирование: создание на поверхности алюминиевого сплава микро- и наноструктур которые могут улучшить смачиваемость, адгезию, трение и другие свойства [7].
- Лазерную очистку: удаление загрязнений и дефектов для улучшения адгезии покрытий и коррозионной стойкости [8].

Параметры лазерной обработки, такие как мощность лазера, скорость сканирования, плотность энергии, длина волны лазера и защитная атмосфера обработки, оказывают существенное влияние на свойства поверхностного слоя алюминиевых сплавов.

Мощность лазера определяет энергию, передаваемую материалу, и, как следствие, температуру обработки. Оптимальные значения мощности (500-3000 Вт) обеспечивают поверхностное упрочнение. Превышение приводит к нежелательным термическим эффектам, таким как перегрев и образование микротрещин.

Скорость перемещения лазерного луча по поверхности материала (скорость сканирования), влияет на время воздействия лазера на материал. Оптимизация скорости обработки играет важную роль в создании желаемых свойств поверхностного слоя. Снижение скорости обработки увеличивает нагрев, меняя микроструктуру и механические характеристики, а более высокая – уменьшает глубину проникновения и температуру обработки [9].

Фокусировка луча определяет и позволяет контролировать площадь воздействия и глубину проникновения энергии в материал. Более концентрированный луч обеспечивает высокую плотность энергии, что приводит к более эффективной обработке. Плотность энергии является критическим параметром, влияющим на структуру и характеристики приповерхностного слоя алюминия после лазерной обработки. Этот параметр вычисляется путем деления мощности лазерного луча на площадь его проекции на поверхности материала. Низкая плотность энергии не вызывает значительных изменений структуры и свойств. Средняя, с плавлением и затвердеванием, формирует мелкозернистую структуру, повышая твердость, коррозионную и износостойкость. Высокая плотность приводит к испарению, абляции и изменению состава. Оптимальная плотность энергии обеспечивает желаемые структурные и функциональные изменения поверхности алюминия без разрушения.

Эффективность лазерной обработки алюминиевых сплавов определяется длиной волны лазера: коротковолновое (УФ, видимый спектр) излучение лучше поглощается алюминием и его оксидами, обеспечивая быстрый нагрев поверхностного слоя, высокую точность модификации, эффективную абляцию загрязнений при очистке и формирование мелких, четких микроструктур при текстуризации. Лазерная закалка с короткими волнами стимулирует образование мелкозернистой структуры и упрочнение поверхности. Длинноволновое (ИК) излучение требует больших энергозатрат из-за худшего поглощения, снижая точность. Выбор длины волны зависит от требуемой глубины модификации: короткие волны предпочтительны для поверхностных изменений, длинные – для обработки глубоких слоев.

Для предотвращения окисления и улучшения качества лазерной обработки используют защитную атмосферу (аргон, гелий и др.), минимизирующую захват газов расплавом, предотвращающую выгорание легирующих элементов и, в некоторых случаях (азот), создающую упрочняющие нитридные фазы. Чистая поверхность улучшает смачиваемость, а параметры защитной атмосферы влияют на конвекцию расплава, теплоотвод и, как следствие, на форму и глубину зоны лазерного воздействия, а также на температуру резки.

Лазерная обработка эффективно модифицирует поверхность алюминиевых сплавов, улучшая их эксплуатационные характеристики. Различные типы лазеров (CO_2 , Nd:YAG и др.) с разными длинами волн и интенсивностью по-разному влияют на обработку: коротковолновые

лазеры лучше поглощаются алюминием, обеспечивая более эффективную обработку [10]. Лазерное легирование (например, слоем Boro Тес 10009) требует высокой плотности мощности, что может приводить к неравномерному проникновению, но позволяет достичь упрочнения до 800HV_{0,1}. В целом, лазерная обработка измельчает зерно, растворяет интерметаллиды и формирует пересыщенные твердые растворы, повышая твердость (на 30–150%), износостойкость (в 2–5 раз) и усталостную прочность (на 15–40%). Образующийся оксидный слой дополнительно улучшает коррозионную стойкость.

Перспективные направления исследований:

- Оптимизация режимов лазерной обработки для достижения заданных свойств.
- Изучение влияния лазерной обработки на усталостную прочность и износостойкость.
- Развитие новых методов (микротекстурирование, аддитивные технологии) для создания функциональных поверхностей.
- Разработка математических моделей для прогнозирования свойств поверхности.

Развитие лазерных технологий откроет возможности для создания алюминиевых сплавов с улучшенными характеристиками и функциональными поверхностями, востребованных в различных отраслях.

Литература

1. Дэвис, Дж. Р. Алюминий и алюминиевые сплавы. ASM international. 1993.
2. Иилбаш Б.С., Сахин А.З. Механизм лазерной резки с кислородным усилением – подход к ламинарному пограничному слою, включая процесс горения. Optics & Laser Technology 27/3 175-184. 1995.
3. Стурнарас А., Ставропулос П., Криссолулис Г. Исследование качества лазерной резки алюминия. Труды 25-го Международного конгресса «Применение лазера и электрооптики», ICALEO. 2006. ст. № 407.
4. Д. Ли, Дж. Мазумдер. Численные исследования параметров лазерной обработки меди и алюминия во время лазерной резки. Материалы 29-го Международного конгресса «Применение лазеров и электрооптики», ICALEO. 2010. Т. 103, 239–248.
5. Иилбас Б.С., Ахтар С.С., Байрактар Э., Гасем З. Лазерная резка тонкого сплава алюминия и кремния: влияние мощности лазера. Advanced Materials Research 445, 2012.442-447.
6. Бергманн, Х.В., Шуберт, Э., & Хунгер, Х. Лазерное поверхностное легирование. - Surface and Coatings Technology, 154 (2-3), 283-290. 2002.
7. Воробьев, А.Ю., & Гуо, Ч. Периодические структуры на поверхности, индуцированные фемтосекундным лазером. Laser & Photonics Reviews, 2013. 7(3), С. 385-407.
8. Уоткинс, К.Г., Ле Харзик, Р., Габздыл, Дж. Т., & Ширд, А.К. Лазерная очистка. Surface Engineering, 21 (1), 28-35. 2005.
9. Молиан, П.А. Лазерная обработка материалов: основы, применение и разработки. Springer Science & Business Media. 2007.

10. Боровски Дж., Воински А. Модификация поверхностных слоев алюминиевых сплавов посредством лазерной обработки. Мат. Международная научная конференция ТРАНСФЕР. 2006.

УДК 62-1/9

И.И. ВЕДЕРНИКОВА, к.т.д., доцент.
П.И. СИНОДЕЕВА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина,
153003, Ивановская область, Иваново, улица Рабфаковская, 34
E-mail: sinodeeva98@bk.ru¹

Виды изнашивания режущего инструмента

Аннотация. В работе были рассмотрены основные виды изнашивания режущего инструмента.

Ключевые слова: режущий инструмент, виды изнашивания, износ.

I.I.VEDERNIKOVA, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
P.I.SINODEEVA, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya street, 34
E-mail: sinodeeva98@bk.ru¹

Types of cutting tool wear

Annotation. The main types of cutting tool wear were considered in the work.

Key words: cutting tool, types of wear, wear.

В современном мире операциям лезвийной обработки уделяется особое внимание. Высокий спрос на производство различных деталей и агрегатов заставляет на постоянной основе проектировать и создавать не только новое оборудование, но и инструменты для этого оборудования. Один из главных вопросов, с которыми сталкиваются инженеры – вопрос износа инструмента, ведь необходимо спроектировать не только новый инструмент, но и долговечный.

В данной статье рассмотрены основные виды износа режущих инструментов: абразивный износ, адгезионный износ, диффузионное изнашивание, окислительный (химический) износ, механический износ и пластическое разрушение режущей части инструмента.

Абразивный износ. Механизм данного износа заключается в том, что твердые частицы обрабатываемого материала, внедряясь в контактные площадки режущего инструмента, царапают их, действуя как микрорезцы. Интенсивность данного износа зависит от твердости инструментального материала и увеличивается по мере ее уменьшения. Интенсивность данного вида износа возрастает при увеличении содер-

жания в сталях цементита и сложных карбидов, в чугунах цементита и фосфидов, в жаропрочных сплавах интерметаллидов, которые сохраняют высокую твердость даже при высоких температурах резания. Контактные поверхности инструмента могут также царапать частицы нароста. Данный вид износа проявляется на низких скоростях резания и, особенно при обработке материалов с ярко выраженными абразивными свойствами. Абразивный износ проявляется в большей степени для быстрорежущего инструмента и в меньшей степени для инструмента, оснащенного твердым сплавом, твердость которого значительно выше твердости быстрорежущей стали. На рис. 1 представлен абразивный износ.



Рис. 1. Абразивный износ

Адгезионный износ. Высокие температуры и нагрузки, действующие на контактных площадках режущего инструмента, способствуют адгезионному взаимодействию материала инструмента и обрабатываемой заготовки. В результате этого на контактных площадках режущего инструмента образуются «мостики схватывания» (рис. 2). При их срезании частицы стали вырываются и уносятся вместе со стружкой. Это происходит из-за наличия в поверхностных слоях инструментов пор и трещин. Интенсивность адгезионного износа варьируется. Скорость разрушения рабочих поверхностей инструментов увеличивается при обработке деталей на пониженных оборотах и высокой шероховатости контактирующих поверхностей.

Диффузионное изнашивание. Оно возникает из-за взаимного проникновения контактирующих материалов друг в друга, к которому приводят тепловые движения в поверхностных слоях. В данном случае (при резании металлов) самое разрушительное воздействие на приспособления оказывает отделение частиц углерода и вольфрама от инструментов и железа – от заготовок. Также возникает самодиффузия. Производящие при этом структурные превращения делают поверхность

ные слои хрупкими. Отделившиеся частицы инструментального материала уносятся вместе со стружкой. Такой износ характерен для твердосплавных инструментов, которые контактируют с заготовками при температуре от 900 до 1200°C.



Рис. 2. Адгезионный износ (Неравномерная деформация поверхностей)

Окислительный (химический) износ. Вид износа под влиянием внешней среды. Содержащийся в воздухе кислород, контактируя с разогретыми инструментами при выполнении операций, проникает в поверхностные слои материалов. В результате образуются твердые химические соединения и растворы. На поверхностях появляются окисные пленки. Они выполняют защитную функцию (рис. 3). Окисные пленки отличаются по прочности. Чем она ниже, тем быстрее происходит разрушение защитных покрытий, затрагивающее верхние слои рабочих поверхностей инструментов. Важно понимать, что с увеличением толщины и уменьшением плотности защитных пленок интенсивность окислительного износа режущих инструментов значительно повышается.



Рис. 3. Окисные пленки (Металлические поверхности меняют цвета)

Механический износ (Хрупкое разрушение). К этому виду износа относят выкрашивание и появление сколов. Выкрашивание – наличие дефектов (трещин, неровностей и т.п.) на рабочей поверхности инструмента. Под воздействием нагрузок мелкие частицы отделяются и уносятся стружкой. Появление сколов – отделение от рабочих поверхностей частиц крупных размеров (происходят при глубоком врезании на низких скоростях).

Пластическое разрушение режущей части инструмента. При высоких температурах в поверхностных слоях режущего инструмента из быстрорежущей стали может происходить пластическое течение материала инструмента.

Литература

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов – Москва «Машиностроение», 1975.

СЕКЦИЯ 19

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.314.224.8

Д.Ю. ВИХАРЕВ, аспирант
А.Ю. МУРЗИН, к.т.н., доцент
Н.А. РОДИН, ст. преподаватель

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

Аналоговый детектор насыщения электромагнитного трансформатора тока

Аннотация. Изменение принципов функционирования устройств релейной защиты может быть одним из способов по исключению её неправильного действия при насыщении электромагнитных трансформаторов тока. В статье предлагается использовать метод определения факта насыщения трансформатора тока как основу для совершенствования принципов функционирования защитных устройств. Описана возможность практической реализации аналогового устройства для определения факта насыщения магнитной системы трансформатора тока на микроэлектронной элементной базе. Представлены схемотехнические решения для основных элементов такого устройства: высокочастотного генератора, измерителя высокочастотного тока. Проведена верификация разработанного устройства с помощью методов математического моделирования. Результаты верификации аналогового детектора насыщения указывают на возможность его практической реализации на существующих объектах электроэнергетики.

Ключевые слова: насыщение, трансформатор тока.

D.Y. VIKHAREV, postgraduate student
A.Y. MURZIN, Candidate of Engineering
N.A. RODIN, Senior Teacher

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

Analog Saturation Detector of an Electromagnetic Current Transformer

Annotation. The modification of operating principles in relay protection devices can be one of the ways to prevent their malfunction during the saturation of electromagnetic current transformers. This article proposes using a method for detecting transformer

saturation as a basis for improving the operating principles of protective devices. The possibility of practical implementation of an analog device for detecting the saturation of a current transformer's magnetic system using a microelectronic component base is described. Circuit design solutions for the main elements of such a device are presented, including a high-frequency generator and a high-frequency current meter. The developed device has been verified using mathematical modeling methods. The verification results of the analog saturation detector indicate the feasibility of its practical implementation in existing power systems.

Key words: saturation, electromagnetic current transformer.

Электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) получили широкое распространение в электрических сетях напряжением 0,66–750 кВ. Они используются для передачи сигнала измерительной информации приборам измерения, защиты, автоматики, сигнализации и управления [1]. Характерной особенностью электромагнитных преобразователей тока является насыщение их магнитной системы в переходных режимах. Известны случаи, когда насыщение трансформаторов тока становилось причиной развития масштабных аварий на объектах электроэнергетики вследствие неправильного действия релейной защиты [2]. В соответствии с [2] основными мероприятиями по исключению неправильного действия релейной защиты в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ, являются замена ТТ, снижение нагрузки на вторичные обмотки ТТ и изменение принципов функционирования устройств релейной защиты. Последнее может заключаться в использовании специальных алгоритмов цифровой обработки вторичного тока. В настоящее время широко изучаются и разрабатываются способы восстановления информации о первичном токе трансформатора тока при насыщении его магнитопровода [3]. Большинство таких способов основаны на применении расчетных выражений, связывающих значения первичного и вторичного токов при условии насыщения магнитной системы. Как показано в [4], восстановление информации о первичном токе может исключить неправильные действия релейной защиты в переходных режимах. Однако, для их практической реализации требуется определять факт насыщения магнитной системы ТТ.

В [5] описан метод детекции факта насыщения трансформатора тока на основе генератора высокочастотного сигнала (ВЧ), включенного последовательно во вторичную цепь. При работе трансформатора тока в пределах класса точности индуктивность цепи намагничивания имеет наибольшее значение, определяющееся наклоном линейного участка вольт-амперной характеристики. Насыщение магнитной системы сопровождается уменьшением сопротивления в цепи намагничивания, что приводит к возрастанию высокочастотного тока во вторичной цепи. Фиксируя этот факт с помощью специального измерителя, возможно реализовать метод детекции насыщения магнитной системы в аналоговом устройстве. Схема подключения такого устройства во вторичную цепь и его структура представлены на рис. 1.

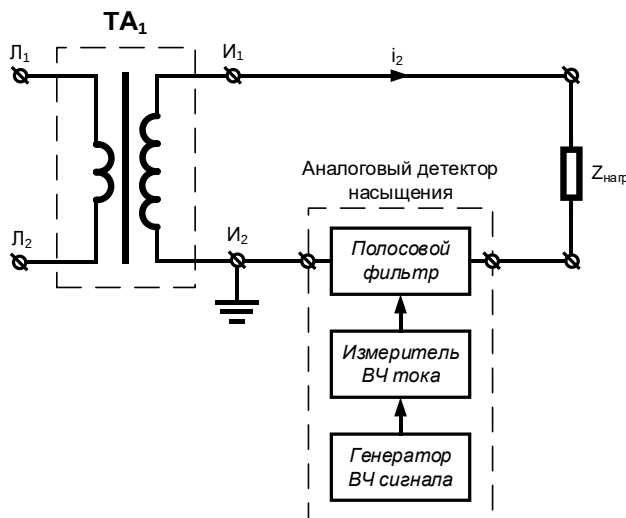


Рис. 1. Схема подключения аналогового детектора насыщения трансформатора тока и его структура

Основными структурными элементами аналогового детектора насыщения являются генератор ВЧ сигнала, измеритель высокочастотного тока, полосовой фильтр. Назначение последнего элемента заключается в фильтрации гармонической составляющей тока промышленной частоты, наличие которой в цепях генератора ВЧ сигнала недопустимо. Полосовой фильтр также должен иметь минимальное входное сопротивление со стороны нагрузки трансформатора тока на частоте 50 Гц. В [5] показано, что сопротивление цепи намагничивания может значительно уменьшаться при насыщении магнитной системы. По этой причине основным требованием к схемотехнической реализации генератора ВЧ сигнала является стабильность частоты и амплитуды выходного сигнала при изменении его нагрузки. Измеритель высокочастотного сигнала должен иметь в своем составе устройство сравнения, определяющее превышение действующего значения ВЧ тока заданной уставки.

Предлагается реализовать аналоговый детектор насыщения на микросэлектронной элементной базе. Она имеет существенные преимущества: малые габариты и масса, низкая стоимость, возможность создания сложных алгоритмов.

Измерения индуктивности цепи намагничивания трансформатора тока основана на источнике высокочастотного напряжения. Одним из наиболее известных электронных генераторов переменного синусои-

дального напряжения является генератор Колпитца [6], электрическая схема которого представлена на рис. 2. Отличительными особенностями этого генератора является стабильность частоты выходного сигнала и простота изготовления. Принцип генерации гармонических колебаний основан на компенсации потерь электрической энергии в колебательном контуре, образованном индуктивностью L_1 и емкостями C_2 , C_3 . Циклическая частота возникающих в контуре колебаний определяется следующим выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}}} \quad (1)$$

Внесение дополнительной электрической энергии в колебательный контур осуществляется с помощью биполярного транзистора VT_1 . Необходимая для работы электронного генератора положительная обратная связь с активным элементом VT_1 реализована на основе резистора R_1 и конденсатора C_1 , шунтирующего базу биполярного транзистора VT_1 по переменному напряжению. Смещение рабочей точки по постоянному току активного элемента VT_1 осуществляется с помощью резистивного делителя напряжения R_1 , R_2 . Выходное напряжение снимается с конденсаторов C_2 , C_3 . Так как в большинстве схем автогенераторов гармонических колебаний нарушается условие статической устойчивости, то в линейном режиме работы схемы выходное напряжение будет неограниченно увеличиваться. Однако, нелинейные характеристики биполярного транзистора позволяют стабилизировать амплитуду выходного сигнала на значении напряжения источника питания U_n .

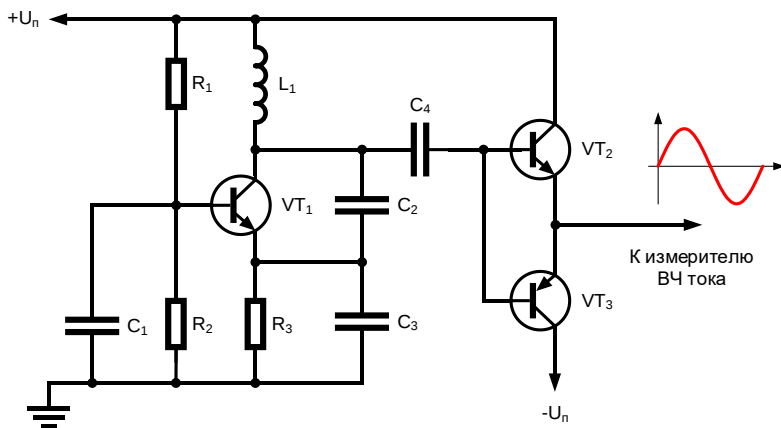


Рис. 2. Электрическая схема высокочастотного генератора

Для увеличения выходной мощности генератора Колпитца к его выходу через конденсатор C_4 подключается двухтактный усилительный каскад на комплементарной паре транзисторов VT_2, VT_3 [6]. Подключение выходного каскада через емкость C_4 необходимо для фильтрации постоянной составляющей напряжения генератора. Нагрузка генератора подключается с соединенным эмиттерам транзисторов двухтактного каскада VT_2, VT_3 .

В ходе вычислительных экспериментов обнаружено, что амплитуда выходного напряжения генератора при корректном выборе параметров схемы вычисляется следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} - U_{\text{бэ}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение источника питания; $U_{\text{бэ}}$ – напряжение база-эмиттер открытых транзисторов VT_2, VT_3 (для кремниевых транзисторов приблизительно составляет 0,6–0,7 В). Также установлено, что в зависимости от типа транзисторов двухтактного каскада генерации колебаний возможна при сопротивлении нагрузки от единиц Ом.

Значение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ не должно превышать определенного значения, при котором уровень высших гармонических составляющих в первичном токе выходит за допустимый предел [7]. Это значение рассчитывается в соответствии с выражением:

$$U_{\text{вых}} < I_{2\text{доп}} \sqrt{\left(X_{\text{нам(лин)}} + X_{\sigma 2} + X_{\text{каб}} + X_{\text{изм}}\right)^2 + \left(R_2 + R_{\text{каб}} + R_{\text{изм}}\right)^2}, \quad (3)$$

где $I_{2\text{доп}}$ – максимально допустимое действующее значение гармоники n -ого порядка во вторичном токе в соответствии с [7]; $X_{\text{нам(лин)}}$, $X_{\sigma 2}$, $X_{\text{каб}}$, $X_{\text{изм}}$ – индуктивное сопротивление цепи намагничивания на линейном участке, вторичной обмотки, кабеля, измерителя ВЧ тока соответственно; R_2 , $R_{\text{каб}}$, $R_{\text{изм}}$ – омическое сопротивление вторичной обмотки, кабеля, измерителя ВЧ тока соответственно.

Значение циклической частоты ВЧ сигнала $f_{\text{вч}}$ должно превышать половину частоты дискретизации измерительного канала устройства релейной защиты, реализованного на микропроцессорной элементной базе. Соблюдение этого условия позволит исключить искажение замера вторичного тока из-за наличия высшей гармонической составляющей.

Для определения факта насыщения магнитной системы трансформатора тока TA_1 требуется измерять значение высокочастотного тока $i_{\text{вч}}$, протекающего во вторичной цепи. Для этих целей разработан измеритель электрического тока в выходной цепи генератора высокочастотного сигнала (см. рис. 3Рис. 3). Один из его выводов подключается к полосовому фильтру, а другой – к выходу генератора Колпитца. Резистор R_1 используется для преобразования высокочастотного тока $i_{\text{вч}}$ в напряжение $u_{\text{вч}}$. Измерение среднего абсолютного значения напряжения $u_{\text{вч}}$ осуществляется с помощью выпрямительной схемы, состоящей из двухобмоточного трансформатора T_1 , полупроводниковых диодов VD_1, VD_2 . Уменьшение пульсации абсолютного значения напряжения

$U_{вч}$ достигается с помощью подключения параллельной RC-цепочки к выходу выпрямительной схемы. Фиксацию превышения значения высокочастотного тока $i_{вч}$ заданной уставкой реализует орган сравнения, состоящий из биполярного транзистора VT_1 , резисторов R_3 – R_5 и источника питания U_n . Выходной дискретный сигнал снимается с коллектора транзистора VT_1 . Сопротивления резисторов R_3 , R_4 должны быть рассчитаны таким образом, чтобы измерительный орган не срабатывал при работе трансформатора тока TA_1 в пределах заданного класса точности. Ток срабатывания измерительного органа $I_{ср}$ рассчитывается в соответствии с выражением:

$$I_{ср} > \frac{U_{вых}}{\sqrt{(X_{нам(лин)} + X_{\sigma 2} + X_{каб} + X_{изм})^2 + (R_2 + R_{каб} + R_{изм})^2}}, \quad (4)$$

где $U_{вых}$ – выходное напряжение ВЧ генератора.

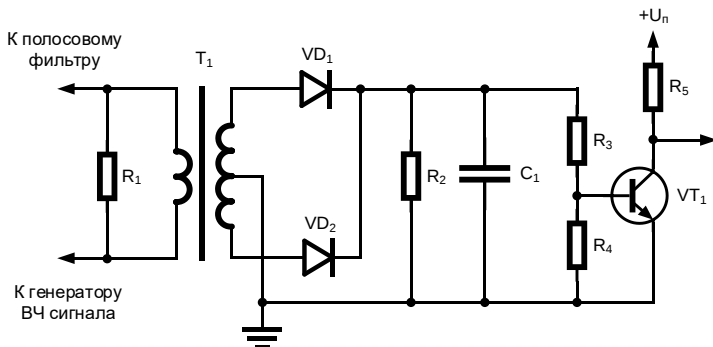


Рис. 3. Электрическая схема измерителя высокочастотного тока

Входное сопротивление измерительной схемы определяется сопротивлением R_1 , так как при корректном выборе параметров RC-цепочки к полупроводниковым диодам VD_1 , VD_2 будет приложено обратное напряжение.

Для верификации разработанной электрической схемы аналогового детектора насыщения предлагается использовать методы математического моделирования. В программном комплексе NI Multisim разработана математическая модель схемы, представленной на рис. 1, на основе предложенных схемотехнических решений на рис. 2 и 3. Для проведения вычислительных экспериментов выбран трансформатор тока ТВ-110, параметры которого представлены в табл. 1.

Результаты вычислительных экспериментов при протекании первичного тока, значение которого многократно превышает ток номинальной предельной кратности, представлены на рис. 4.

Анализ осциллограмм электрических величин, представленных на рис. 4, показывает, что значение высокочастотного тока $i_{вч}$ увеличива-

ется только при насыщении магнитной системы трансформатора тока ТА₁.

Таблица 1. Паспортные параметры трансформатора тока ТВ-110

Наименование параметра	Значение	Единицы измерения
Номинальный первичный ток	500	А
Номинальный вторичный ток	5	А
Длина средней силовой магнитной линии	1.38	м
Площадь поперечного сечения магнитопровода	80	см ²
Вектор напряженности магнитного поля	[0.0, 40.38, 80.85, 121.52, 162.55, 204.18, 246.79, 291.00, 337.79, 388.76, 446.48, 515.11, 601.39, 716.17, 877.02, 1112.00, 1468.00, 2018.00, 2882.00, 4255.00, 6448.00]	А/м
Вектор магнитной индукции	[0.0, 0.07, 0.14, 0.21, 0.28, 0.35, 0.42, 0.49, 0.56, 0.63, 0.70, 0.77, 0.84, 0.91, 0.98, 1.05, 1.12, 1.18, 1.26, 1.33, 1.40]	Тл

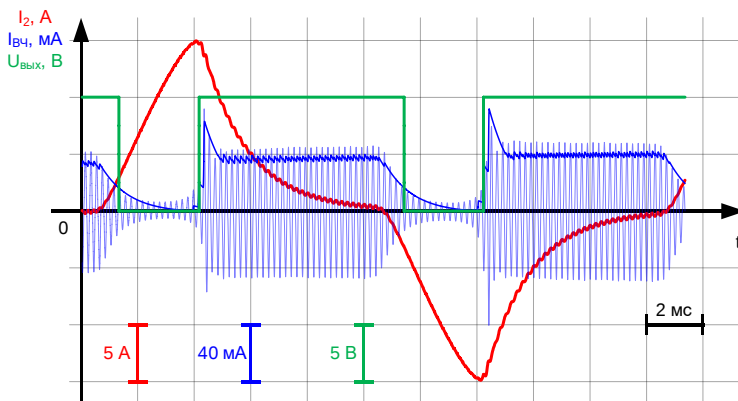


Рис. 4. Результаты вычислительных экспериментов по верификации аналогового детектора насыщения трансформатора тока

Факт насыщения можно визуально определить по искажению формы временной зависимости вторичного тока i_2 . Измеритель сигнала фиксирует возрастание амплитуды высокочастотного сигнала при насыщении, формируя напряжение источника питания U_n на своем выходе. Значение

тока $i_{вч}$ остается постоянным в течение всего процесса насыщения магнитной системы ТА₁. Выходной сигнал $U_{вых}$ практически мгновенно возвращается к нулевому значению при переходе трансформатора тока в линейный режим. В ходе вычислительных опытов обнаружено, что частота и амплитуда выходного сигнала высокочастотного генераторы оставались практически неизменными в различных режимах, что указывает на возможность его практической реализации.

Таким образом, для определения насыщения магнитной системы трансформатора тока может быть использовать аналоговый детектор на микроэлектронной элементной базе. Основными преимуществами такого устройства являются возможность определение интервала времени, на котором происходит насыщение, быстродействие, отсутствие программируемых элементов, простота изготовления и низкая стоимость.

Литература

1. ГОСТ 7746-2015 Трансформаторы тока. Общие технические условия.
2. Письмо заместителя министра энергетики от 02.04.2019 № ЧА-3440/10. «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты».
3. Кужеков, С.Л. Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, Б.Б. Сербиновский // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 3(28). С. 43-51.
4. Вихарев, Д.Ю. Восстановление приведенного первичного тока трансформатора тока для исключения излишней работы дифференциальной защиты трансформатора / Д. Ю. Вихарев, Н. А. Родин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета, Иваново, 31 мая – 02 июня 2023 года. Т. 3. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. С. 404-407. EDN YANOSI.
5. Вихарев, Д.Ю. Определение факта насыщения магнитопровода трансформатора тока на основе непрерывного измерения сопротивления цепи намагничивания / Р.Д. Айсин, Д.Ю. Вихарев, А.Ю. Мурзин, Н.А. Родин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2024. № 4. С. 53-63. DOI 10.17588/2072-2672.2024.4.053-063. EDN CNDPLE.
6. Horowitz, P., Hill, W. The art of electronics (3rd ed.). Cambridge University Press, 2015.
7. IEEE Std 519-2022, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.

УДК: 621.314.224

А.А. ЯБЛОКОВ¹, к.т.н., доцент,
А.В. ПАНАЩАТЕНКО¹, аспирант,
С.Е. БОБРОВ², к.т.н., рук. обособленного
подразделения в г. Иваново

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

²АО «РАДИУС Автоматика»

153025, г. Иваново, ул. Тимирязева, 1с2

E-mail: andrewyablokov@yandex.ru, pan.anton_@mail.ru, bobrov@rza.ru

Определение интервалов времени отсутствия насыщения магнитопроводов ТТ в переходном режиме короткого замыкания

Аннотация. При работе электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) наблюдаются интервалы времени, в течение которых невозможно насыщение их магнитопроводов. На таких интервалах мгновенные значения первичного тока имеют знак, противоположный возникшей аperiodической составляющей, соответственно, модуль магнитной индукции в сердечнике магнитопровода снижается и не может оказаться выше индукции насыщения. В статье представлены результаты определения данных интервалов при различных значениях постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ. Полученные результаты могут быть использованы при расчетах времени до насыщения магнитопроводов ТТ и проверке требуемого устройствами релейной защиты (УРЗ) времени точной трансформации тока.

Ключевые слова: трансформаторы тока, насыщение магнитопровода

A.A. YABLOKOV¹, Ph.D.
A.V. PANASHCHATENKO¹, postgraduate student
S.E. BOBROV², Ph.D., head of a separate division in Ivanovo city

¹Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

²JSC «Radius-Avtomatika»

153025, Ivanovo, Timiryazeva St., 1b2

E-mail: andrewyablokov@yandex.ru, pan.anton_@mail.ru, bobrov@rza.ru

Determination of time intervals for saturation absence in magnetic core of CT for transient mode of short current

Abstract. During operation of electromagnetic current transformers (CTs), time intervals are observed during which saturation of their magnetic cores is impossible. In such intervals, the instantaneous values of the primary current have a sign opposite to the arisen aperiodic component, respectively, the modulus of magnetic induction in the magnetic core decreases and cannot be higher than the saturation induction. The article presents the results of determining these intervals for different values of the attenuation time constant of the aperiodic component of the short-circuit current. The obtained results can be used in calculating the time until saturation of the CTs mag-

netic cores and checking the time of accurate current transformation required by relay protection applications (RPA).

Key words: current transformers, magnetic core saturation

Введение. Исследования с целью определения требуемого УРЗ времени точной трансформации тока [1], а также проверка правильности работы УРЗ при значении этого времени, заданного производителем [2] подразумевает создание случаев КЗ с различным временем до насыщения магнитопровода ТТ. Результаты исследований механизмов работы ТТ, полученные при создании их имитационных моделей, тестирование УРЗ одного из крупнейших отечественных производителей [1] и вывод аналитических формул наихудшего угла КЗ (ϑ) [3] показали наличие интервалов времени, в течение которых первое насыщение магнитопровода ТТ физически невозможно.

Целью данной работы является поиск таких интервалов при различных значениях постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ (T_a).

Определение интервалов по формуле коэффициента переходного режима. График коэффициента переходного режима ($K_{п.р.}(t)$), имеет множество локальных минимумов и максимумов [4] (рис. 1а).

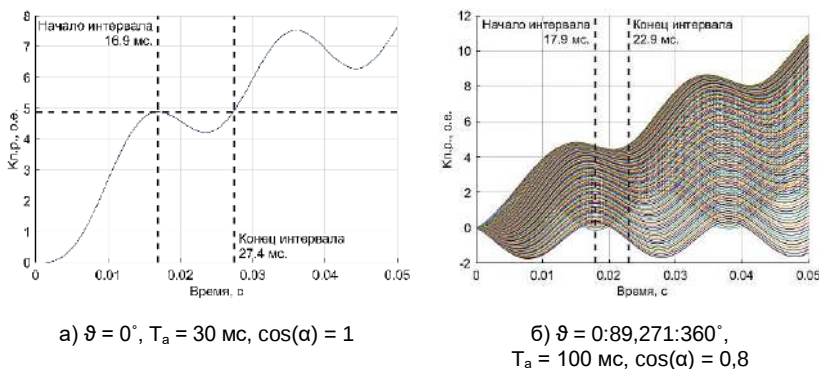


Рис. 1. Пример определения интервала времени по одной (а) и семействам кривых (б) переходного режима при различных параметрах функционирования ТТ

Локальные максимумы «перекрывают» собой кривую переходного режима, таким образом для части кривой невозможно получить пересечение с прямой, соответствующей параметру режима А (т.е. невозможно создать насыщение магнитопровода ТТ в интервалах времени, примыкающих к локальным минимумам функции коэффициента переходного режима). Значения интервалов (табл. 1) были определены для семейств кривых (рис. 1б), полученных при варьировании ϑ и T_a , для каждой конкретной кривой переходного режима было найдено макси-

мальное значение начала интервала и минимальное значение конца интервала. Исследования влияния величины соотношения активного и реактивного сопротивления полного вторичного контура ТТ ($\cos(\alpha)$) для ТТ класса Р или T_s для ТТ класса ТРУ, ТРХ показали, что меньшие интервалы наблюдаются при чисто активном сопротивлении, а при увеличении индуктивного сопротивления величина интервалов увеличивается.

Таблица 1. Сводная таблица интервалов

Способ	$\theta,^\circ$	$\cos(\alpha)$	$T_a, \text{мс}$					
			15	30	75	100	300	400
График $K_{п.р.}(t)$	0	1	16,1-30	16,9-27,4	17,9-24,7	18,1-24,1	18,9-22,4	19-22,1
	0:89	1	16,1-27,7	16,9-26	17,9-24	18,1-23,5	18,9-22	19-21,8
	0:89,271:360	1	19,2-27,7	19,5-26	19,8-24	19,9-23,5	20-22	20-21,8
	0:89,271:360	0,8	17,1-26,2	17,4-24,7	17,6-23,2	17,9-22,9	17,8-22,1	17,8-22
График $B(t)$	0	1	15,3-28,9	16,4-26,8	17,5-24,5	17,8-23,9	18,5-22,5	18,6-22,2
	0:90	1	15,3-27,3	16,4-25,5	17,5-23,6	17,8-23,2	18,5-21,9	18,6-21,7
	0:90,270:360	1	18,8-27,3	19,2-25,5	19,4-23,6	19,5-23,2	19,6-21,9	19,6-21,7
$t_{\text{нас}}$ (В(Н))	0	1	15-29,1	16-27	16,9-25	17,1-24,5	17,8-23,5	17,8-23,3
	0:89	1	15-28,4	16-26,4	16,9-24,5	17,1-24,1	17,8-23,1	17,8-22,9
	0:89,271:360	1	15-28,4	16-26,4	17-24,5	17,2-24,1	17,8-23,1	17,8-22,9
$t_{\text{нас}}$ (ПХН)	0	1	15,2-29	16,2-26,8	17,3-24,5	17,5-24	18,4-22,5	18,3-22,2
	0:89,271:360	1	14,9-28,7	16-26,5	17,1-24,2	17,3-23,7	17,9-22,2	18,1-22

Определение интервалов по графикам магнитной индукции.

График фактического значения индукции $B(t)$ (рис. 2) также как и график кривой коэффициента переходного режима имеет множество локальных минимумов и максимумов. Насыщение магнитопровода ТТ невозможно в интервалах времени, где локальный максимум «перекрывает» график индукции, соответственно в этих точках невозможно достижение значения индукции насыщения. Исследование интервалов времени по графикам индукции было выполнено в разработанной и верифицированной имитационной модели ТТ, выполненной на основе полной характеристики намагничивания $B(H)$, реализованной в виде подсистемы блоков в программном комплексе MATLAB/Simulink (рис. 3).

Определение интервалов по результатам расчетов времени до насыщения магнитопроводов ТТ. Этот способ подразумевает выполнение анализа результатов расчетов времени до насыщения магнитопроводов ТТ с использованием имитационных моделей ТТ на основе ПХН и $B(H)$ (рис. 3). Различные случаи насыщения магнитопроводов ТТ были получены варьированием нагрузки и угла $K3$ с очень маленьким шагом, полученные времена были ранжированы по возрастанию времени до насыщения магнитопровода ТТ, что позволило увидеть интервалы в которых насыщение магнитопровода ТТ создать не удалось.

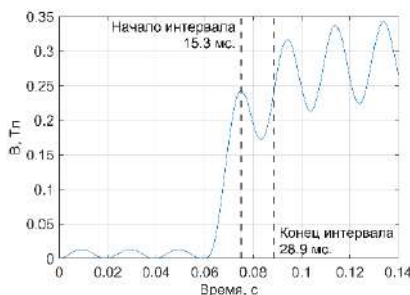


Рис. 2. Пример определения интервала времени (от момента КЗ) по графику магнитной индукции ($\vartheta = 0^\circ$, $T_a = 15$ мс)

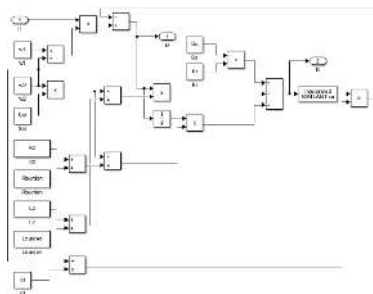


Рис. 3. Схема разработанной имитационной модели электромагнитного ТТ

Итоговые результаты. Интервалы, зафиксированные тремя вышеописанными способами, представлены в табл. 1. По данным таблицы наблюдается зависимость интервалов от величины T_a и $\cos(\alpha)$. Варьирование ϑ позволяет уменьшить интервалы, в которых невозможно насыщение магнитопроводов ТТ.

Выводы. Все методы дают примерно один результат, расхождение связано с погрешностью используемых методов. Данные о величине интервалов, в которых невозможно насыщение магнитопровода ТТ, могут быть использованы при проверке результатов расчетов времени до насыщения магнитопроводов ТТ и при исследовании УРЗ в переходных режимах, сопровождающихся насыщением магнитопроводов ТТ, для проверки достаточности количества используемых осциллограмм.

Литература

1. Методика определения, требуемого для корректной работы устройств релейной защиты времени точной трансформации тока в переходных режимах, сопровождающихся насыщением магнитопроводов трансформаторов тока / А.В. Панащатенко, А.А. Яблоков, С.Е. Бобров // Релейная защита и автоматизация. 2025. №1(58). С. 26-38.
2. ГОСТ Р 70358-2022. «Требования к работе устройств релейной защиты линий электропередачи классом напряжения 110 кВ и выше в переходных режимах, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока». М.: Стандартинформ, 2022. – 60 с.
3. Разработка методики выбора трансформаторов тока с учётом их работы в переходных режимах / А.А. Яблоков, А.В. Панащатенко, А.С. Лифшиц, А.Е. Петров // Энергетик. 2024. № 2. С. 40-47.
4. ГОСТ Р 58669-2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях. М.: Стандартинформ, 2020. 58 с.

УДК 621.315.2

Д.Ю. ВИХАРЕВ, аспирант
А.Ю. МУРЗИН, к.т.н., доцент
Н.А. РОДИН, ст. преподаватель

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

Анализ распределения электрического тока в экранах трехфазной группы одножильных силовых кабелей

Аннотация. В статье приведено обоснование необходимости описания распределения электрического тока в экране силового кабеля без учета влияния окружающего кабельную линию грунта. Определен характер распределения электрического тока в экране с учетом расположения одножильных силовых кабелей. Представлена методика расчета собственной индуктивности экрана и коэффициента взаимной индукции между экраном и токопроводящей жилой с учетом путей протекания электрического тока в экране. Определены основные параметры кабельной линии, от которых зависит влияние тока экрана на ее удельные параметры. Проведен анализ собственной индуктивности и коэффициента взаимной индукции как функций геометрических параметров кабельной линии.

Ключевые слова: кабельная линия, экран, индуктивность.

D.Y. VIKHAREV, postgraduate student
A.Y. MURZIN, Candidate of Engineering
N.A. RODIN, Senior Teacher

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

Analysis of Electric Current Distribution in the Sheaths of a Three-Phase Group of Single-Core Power Cables

Annotation. The paper substantiates the necessity of describing the distribution of electric current in the sheath of a power cable without considering the influence of the surrounding soil. The nature of current distribution in the sheath is determined, taking into account the arrangement of single-core power cables. A calculation method is presented for determining the self-inductance of the sheath and the mutual inductance coefficient between the sheath and the conductor, considering the current paths in the sheath. The key parameters of the cable system that influence the impact of sheath current on its electrical characteristics are identified. An analysis of self-inductance and mutual inductance as functions of the geometric parameters of the cable system is carried out.

Key words: cable system, sheath, inductance.

В настоящее время кабельные линии электропередачи (КЛ) напряжением 110 кВ и выше находят широкое применение при сооружении электрических сетей крупных городов, в схемах электроснабжения предприятий различных отраслей промышленности на территории России [1]. Для построения КЛ в электрических сетях напряжением 110 кВ широко используются трехфазные группы одножильных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. При расчете удельных параметров таких кабельных линий требуется учитывать влияние экранирующего проводника [2,3]. Основными параметрами, учитывающими это влияние, являются собственная индуктивность L_s экрана и коэффициент взаимной индукции между токопроводящей жилой и экраном M_s . Известные в настоящее время расчетные выражения основаны на представлении об обратном проводнике, моделирующем распределение электрического тока в грунте [2,3]. Такой способ описания параметров L_s и M_s предполагает протекание электрического тока не только по сечению экрана, но и по земле, окружающей кабельную линию. Однако, как будет показано далее, электрический ток замыкается по различным путям в самом экране, образуя ток циркуляции. Таким образом, актуальной задачей является описание распределения электрического тока в экранирующем проводнике одножильного силового кабеля и определение собственной и взаимной индуктивностей L_s и M_s .

При протекании электрического тока в жиле одной фазы вокруг нее создается магнитное поле, силовые линии которого пересекают экран другой фазы (рис. 1). Так как электрический ток имеет переменный характер, в экране соседней фазы должна индуцироваться электродвижущая сила (ЭДС). В соответствии с правилом Ленца вектор ЭДС будет направлен таким образом, чтобы уменьшить изменение внешнего магнитного поля. В этом заключается основное назначение экранирующего проводника в составе силового одножильного кабеля.

Распределение электрического тока по поверхности экрана имеет сложный характер. В простейшем случае, когда силовые линии внешнего магнитного поля имеют вид прямых линий, электрический ток будет протекать и замыкаться по двум одинаковым частям экрана, каждая из которых имеет форму половины полого цилиндра. Это справедливо в тех условиях, когда поперечные размеры экрана пренебрежительно малы в сравнении с расстоянием между двумя соседними фазами.

Однако, в общем случае силовые линии магнитного поля, созданного жилой одной фазы, имеют вид концентрических окружностей. Тогда разделить экран на две одинаковые части, по которым будет замыкаться электрический ток, не получится в силу несимметрии внешнего магнитного поля. Для определения путей протекания электрического тока необходимо представить экран в виде структуры элементарных трубок с бесконечно малой площадью поперечного сечения [4]. Предполагается, что трубки, по которым замыкается элементарный ток ΔI_s , располагаются на пересечении поверхности экрана и прямой, выходя-

щей из геометрического центра жилы соседней фазы, как показано на рис. 2. Таким образом, при направлении тока жилы «от нас» по внешней части экрана, которая отмечена красным цветом, ток ΔI_s протекает в направлении «от нас», а по внутренней (отмечена синим цветом) – в направлении «к нам». Точка разделения двух частей располагается в месте пересечения касательной и поверхности экрана. Такое токораспределение, по мнению авторов, будет наиболее приближенным к действительному. Однако, точное определение путей протекания тока по поверхности экрана остается предметом дальнейших исследований.

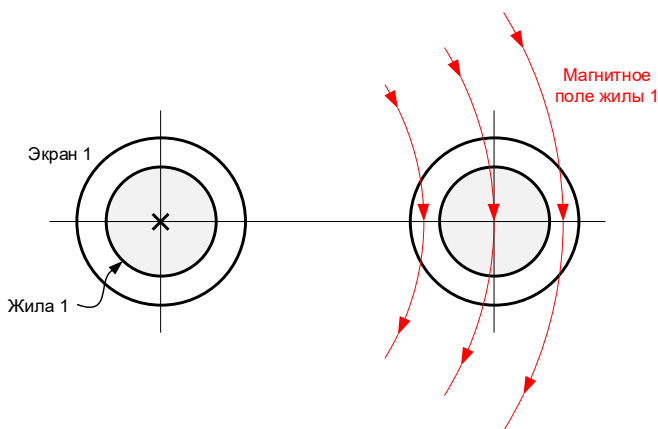


Рис. 1. Силовые линии магнитного поля, создаваемого токопроводящей жилой

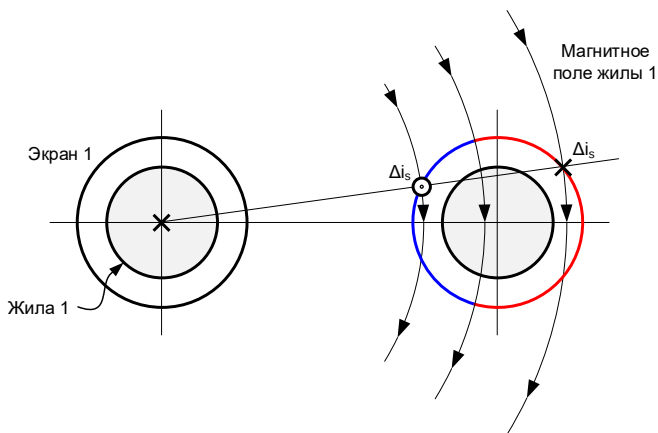


Рис. 2. Распределение электрического тока по поперечному сечению экрана

В соответствии с [4] коэффициент взаимной индукции с учетом формы поперечного сечения проводника определяется следующим выражением:

$$M = \frac{1}{i \cdot S} \int \Phi dS, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения проводника, Φ – магнитный поток, созданный током i и сцепленный с трубкой поперечного сечения dS .

Выражение (1) основано на том, что форма поперечного сечения проводника должна быть одинаковой как, например, для кольцевого объемного проводника. Однако, распределение электрического тока по поперечному сечению экрана имеет неоднородный характер, как показано на рисунке. Также целесообразно представить экран бесконечно тонким в отношении его толщины. С учетом этих факторов расчетное выражение (1) можно записать следующим образом:

$$M_s = \frac{1}{i_c l_1 l_2} \iint \Phi_c (dl_1, dl_2) dl_2 dl_1, \quad (2)$$

где l_1, l_2 – длины внутренней и внешней дуг (отмечены синим и красным цветами соответственно на рис. 2 Рис.). dl_1, dl_2 – длины элементарных участков внутренней и внешней дуг; Φ_c – магнитный поток, созданный током жилы i_c . Магнитный поток в выражении зависит от расположения элементарных участков dl_1, dl_2 относительно токопроводящей жилы соседней фазы.

Для аналитического преобразования выражения (2) предлагается ввести обозначения, которые представлены на рис. 3.

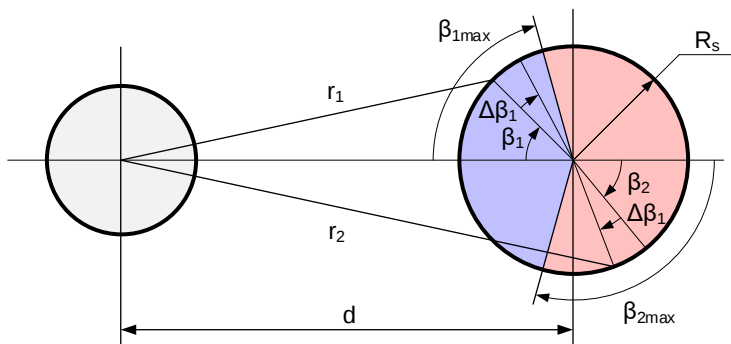


Рис. 3. К расчету коэффициента взаимной индукции токопроводящей жилы и экрана

Для расчета магнитного потока Φ_c используется понятие векторного потенциала магнитного поля [5]. В упрощенном случае, когда токопро-

водящая жила имеет вид тонкого прямолинейного проводника, магнитный поток рассчитывается следующим образом:

$$\Phi_c(r_1, r_2) = L A_c(r_2) - A_c(r_1) = L \frac{\mu_0 i_c}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right), \quad (3)$$

где $A_c(r_1)$, $A_c(r_2)$ – модули векторного потенциала на расстоянии r_1 , r_2 от геометрического центра жилы (см. рис. 3); L – длина жилы и экрана; μ_0 – магнитная постоянная в системе СИ.

Переменные интегрирования dl_1 , dl_2 можно выразить через соответствующие углы β_1 , β_2 , обозначенные на рис. 3.:

$$\begin{aligned} dl_1 &= R_s d\beta_1, \\ dl_2 &= R_s d\beta_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где R_s – радиус экрана.

Расстояния r_1 , r_2 до элементарных частей dl_1 , dl_2 также можно определить через углы β_1 , β_2 :

$$\begin{aligned} r_1 \beta_1 &= \sqrt{d - R_s \cos \beta_1^2 + \sin \beta_1^2}, \\ r_2 \beta_2 &= \sqrt{d + R_s \cos \beta_2^2 + \sin \beta_2^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где d – расстояние между центрами жилы и экрана в соответствии с рис. 3.

С учетом (2) – (5) выражение (2) примет вид:

$$M_s = \frac{L R_s^2}{(2R_{s1\max}) \cdot ((2R_{s2\max}))} \int_{-\beta_{1\max}}^{\beta_{1\max}} \int_{-\beta_{2\max}}^{\beta_{2\max}} \Phi_c(r_1(\beta_1), r_2(\beta_2)) d\beta_2 d\beta_1. \quad (6)$$

Выражение (6) может быть использовано для расчета коэффициента взаимной индукции M между токопроводящей жилой и экраном соседней фазы.

Для расчета тока I_s , протекающего по поверхности экрана, при заданном токе жилы соседней фазы необходимы значения собственной индуктивности и активного сопротивления экрана. Величина собственной индуктивности экрана L_s определяется выражением, аналогичным (2):

$$L_s = \frac{1}{i_{s1} l_2 l_1 l_2} \iint \Phi_s(dl_1, dl_2) dl_2 dl_1, \quad (7)$$

где Φ_s – магнитный поток, созданный током экрана I_s .

Магнитный поток Φ_s может быть рассчитан с помощью векторного потенциала магнитного поля A_s :

$$\Phi_s \beta_1, \beta_2 = L A_s \beta_2 - A_s \beta_1. \quad (8)$$

Различие формул (3) и (8) заключается в используемых переменных и выражении для расчета потенциала. Так как модуль векторного потенциала магнитного поля для расчета собственной индуктивности

определяется только на поверхности экрана, целесообразно представить A_s как функцию от угла δ , отсчет которого аналогичен β_2 . Функция векторного потенциала A_s в соответствии с [5] можно представить следующим образом:

$$A_s \delta = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{2R_s\beta_{1\max}} \int_{\pi-\beta_{1\max}}^{\pi+\beta_{1\max}} \ln \left(\frac{1}{R_s \sqrt{2(1-\cos \delta - \beta)}} \right) d\beta_1 + \\ + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{2R_s\beta_{2\max}} \int_{-\beta_{2\max}}^{\beta_{2\max}} \ln \left(\frac{1}{R_s \sqrt{2(1-\cos \delta - \beta)}} \right) d\beta_2. \quad (9)$$

Тогда с учетом (4), (8), (9) выражение (7) примет следующий вид:

$$L_s = \frac{LR_s^2}{(2R_s\beta_{1\max}) \cdot ((2R_s\beta_{2\max}))} \int_{\pi-\beta_{1\max}}^{\pi+\beta_{1\max}} \int_{-\beta_{2\max}}^{\beta_{2\max}} \Phi_s(\beta_1, \beta_2) d\beta_2 d\beta_1. \quad (10)$$

Выражение (10) может быть использовано для расчета собственной индуктивности экрана с учетом характера распределения электрического тока, индуцированного токопроводящей жилой соседней фазы.

В ходе вычислительных экспериментов обнаружено, что значения взаимной и собственной индуктивностей M_s , L_s зависят только от соотношения расстояния между соседними фазами d и радиусом экрана R_s . Графические зависимости M_s , L_s от описанного соотношения представлены на рис. 4.

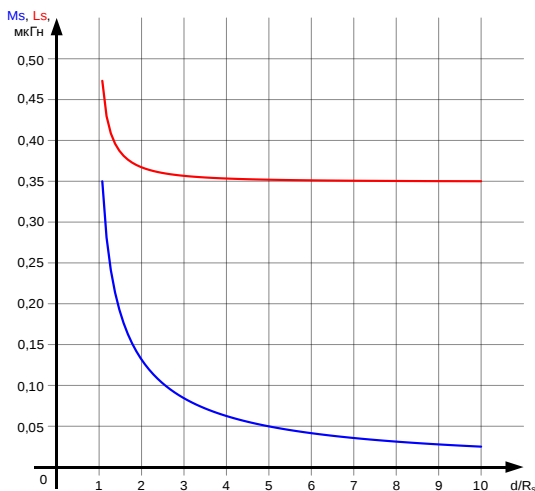


Рис. 4. Зависимость собственной индуктивности L_s (красная кривая) и коэффициента взаимной индукции M_s (синяя кривая) от соотношения расстояния между соседними фазами d и радиусом экрана R_s

Изображенные зависимости M_s , L_s обладают несколькими особенностями:

1. Значение собственной и взаимной индуктивностей стремятся к бесконечности при приближении отношения d/R_s к единице.
2. Значение коэффициента взаимной индуктивности M_s стремится к нулю при увеличении значения отношения d/R_s .
3. Значение собственной индуктивности L_s стремится к значению **0,3415 мкГн** при увеличении значения отношения d/R_s .

Полученные выражения (6), (10) и графические зависимости, изображенные на рис. 4 могут быть использованы для моделирования кабельных линий, состоящих из трехфазной группы одножильных силовых кабелей.

Литература

1. Файбисович Д. Л., Карапетян И. Г., Шапиро И. М. Справочник по проектированию электрических сетей М.: НЦ ЭНАС. 2012. 376 с.
2. Tleis, Nasser D. Power Systems Modelling and Fault Analysis : Theory and Practice. Second edition. London: Academic Press, 2019. Print.
3. H. W. Dommel. "EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation," Vancouver, British Columbia, 1996.
4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
5. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976 616 с.

УДК 621.316.9

Д.Ю. ВИХАРЕВ, аспирант
А.Ю. МУРЗИН, к.т.н., доцент
Н.А. РОДИН, ст. преподаватель

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

Избиратель поврежденного участка кабельно-воздушной линии электропередачи

Аннотация. Применение устройств автоматического повторного включения на кабельно-воздушных линиях электропередачи является противоречивым с точки зрения возможности самоустранения короткого замыкания. Повреждения кабельного участка являются устойчивыми, при повторных включениях приводят к большому разрушению кабельной вставки. Поэтому актуальной задачей является разработка метода определения повреждения кабельного участка смешанных линий. В статье представлен подход к применению дистанционного органа от однофазных коротких замыканий для идентификации повреждения кабельного участка для КВЛ.

Ключевые слова: автоматическое повторное включение, кабельно-воздушная линия электропередачи.

D.Y. VIKHAREV, postgraduate student
A.Y. MURZIN, Candidate of Engineering
N.A. RODIN, Senior Lecturer

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

Cable fault detector of the mixed transmission line

Annotation. The use of autoreclosing devices on mixed transmission lines is controversial in terms of the possibility of self-extinguishing a short circuit. Fault to the cable section is stable, and repeated inclusions lead to large damage to the cable insert. Therefore, an urgent task is to develop a method for determining short circuit to the cable section of mixed lines. The article presents an approach to the use of a distance protection algorithms from single-phase short circuits to identify fault to the cable section for mixed transmission lines.

Key words: autoreclosing, mixed transmission line.

Автоматическое повторное включение (АПВ) – вид сетевой автоматики, предназначенный для повышения надёжности работы энергосистем и обеспечения бесперебойного питания потребителей. Область применения АПВ включает в себя энергообъекты, на которых могут возникнуть самоустраняющиеся короткие замыкания (КЗ), наиболее распространёнными из которых являются линии электропередачи (ЛЭП). Согласно статистике [1], доля неустойчивых повреждений воздушных ЛЭП составляет от 50 % до 90 % от общего числа повреждений, что подтверждает безусловную пользу применения АПВ. На кабельных линиях в сетях с глухо- и эффективно заземлённой нейтралью применение АПВ не оправданно, так как изоляция в месте КЗ остаётся постоянно повреждённой, даже в случае обесточения ЛЭП.

Применение АПВ на смешанных кабельно-воздушных линиях (КВЛ) является спорным с точки зрения возможности успешного включения. Существует несколько подходов к применению указанного вида сетевой автоматики на таких ЛЭП. Так, в ряде стран Европы предусматривается АПВ без определения повреждённого участка, в других же допускается АПВ только с функцией определения повреждённого участка КВЛ [2]. В Российской Федерации применяются оба вида АПВ, а в некоторых случаях АПВ запрещено. Согласно [3] АПВ КВЛ применяется, если кабельная вставка реализует заход в распределительное устройство. Исключением является организация захода в комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией. Во всех остальных случаях применение АПВ КВЛ должно определяться проектными решениями.

Наиболее эффективным решением организации АПВ КВЛ является применение функции определения повреждённого участка ЛЭП, которая позволяет выявить повреждение кабельной вставки и заблокировать дальнейшее действие АПВ. Существуют различные методы опре-

деления повреждённого участка для реализации функции АПВ КВЛ, среди которых можно выделить группу методов по параметрам аварийного режима и группу высокочастотных методов. Применение высокочастотных методов сопровождается установкой дополнительной дорогостоящей аппаратуры. Методы по параметрам аварийного режима можно разделить на двухсторонние и односторонние. Наиболее распространёнными решениями в части организации определения повреждённого участка КВЛ являются метод контроля тока в месте заземления экрана кабеля и дифференциальный токовый метод, позволяющий организовать продольную дифференциальную токовую защиту кабельной вставки с дальнейшим запретом АПВ ЛЭП при срабатывании. Все указанные методы сопровождаются установкой дополнительного оборудования.

Целью исследования является разработка одностороннего дистанционного метода определения повреждённого участка ЛЭП по параметрам аварийного режима, который не требует установки аппаратуры для реализации запрета АПВ при повреждении на кабельном участке и может быть реализован в микропроцессорных устройствах релейной защиты и автоматики.

Наиболее распространённые повреждения кабельных участков – однофазные КЗ в кабельных муфтах, которые сопровождаются пробоем изоляции между жилой и экраном кабеля в результате её старения. Поэтому для реализации метода предлагается применить ступень дистанционной защиты от однофазных КЗ с дальнейшим запретом АПВ ЛЭП.

При реализации захода в распределительное устройство кабельная вставка располагается с одной стороны линии. В случае прохождения ЛЭП через городскую местность, кабельная вставка может быть проложена на расстоянии от начала и конца ЛЭП. Варианты расположения кабельной вставки КВЛ представлены на рис. 1.

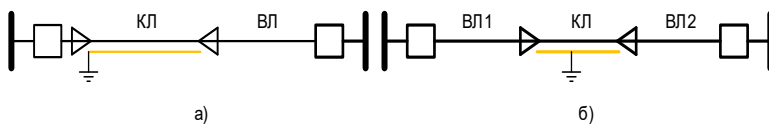


Рис.1. Варианты расположения кабельного участка на КВЛ:

а) кабельная вставка в начале КВЛ; б) кабельная вставка на расстоянии от начала и конца КВЛ.

Заземление экрана кабеля КВЛ в одной точке позволяет выявить принцип определения повреждённого участка с помощью дистанционного измерительного органа от однофазных КЗ. Так при однофазном КЗ на кабельной вставке ток будет протекать от источника к месту заземления экрана, как показано на рис.

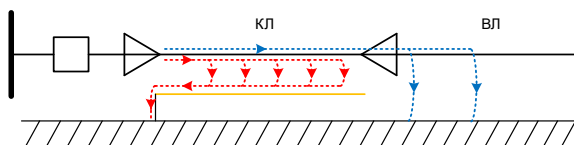


Рис. 2. Пути протекания токов при повреждениях на воздушном и кабельном участках КВЛ

В этом случае, благодаря возврату тока по экрану индуктивное сопротивление мало. В случае перехода повреждения на воздушный участок, индуктивное сопротивление резко возрастает, так как ток протекает по земле, представляющей собой эквивалентный проводник на определённом расстоянии. Качественная зависимость реактивной составляющей дистанционного измерительного органа от однофазных КЗ от расстояния до места повреждения для КВЛ с кабельным участком в начале представлена на рис. 3.

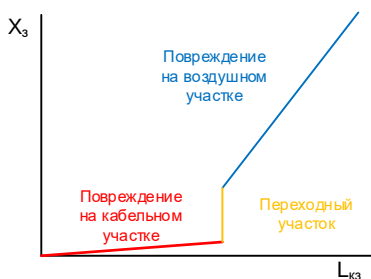


Рис. 3. Зависимость реактивного сопротивления на зажимах измерительного органа от однофазных КЗ от расстояния до места повреждения на КВЛ с кабельной вставкой в начале ЛЭП

Таким образом, благодаря возврату тока по экрану кабеля, при перемещении места повреждения с конца кабельного участка на воздушный замер сопротивления резко возрастает, благодаря чему с помощью правильного выбора параметров срабатывания ступени дистанционной защиты возможно произвести определение повреждения кабельного участка и подать команду на запрет АПВ КВЛ.

В случае расположения кабельного участка на расстоянии от начала линии также можно определить повреждённый участок с помощью дистанционного органа, однако эффективность одностороннего замера ограничивается расположением места заземления экрана на кабельной вставке. На рисунке 4 представлены качественные зависимости реактивной составляющей дистанционного измерительного органа от однофазных КЗ от расстояния до места повреждения для КВЛ с кабельным участком на расстоянии от начала ЛЭП.

На рис. 4 показано, что при расположении места заземления экрана в промежуточной точке (ситуация № 1), также как и в случае наличия кабельной вставки в начале ЛЭП, наблюдаются резкие изменения замера дистанционного органа при перемещении повреждения с воздушного участка на кабельный. Однако, если заземление экрана располагается с одного из концов кабельного участка (ситуации № 2 и 3), измерительный орган дистанционной защиты с той стороны ЛЭП, с которой кабель заземлён, не сможет отличить повреждение на кабельном и воздушном участках. В таком случае эффективным является только способ передачи блокирующего сигнала АПВ на противоположный конец КВЛ по каналу связи от дистанционного органа, расположенного на обратной стороне линии.

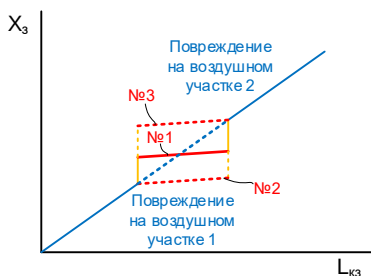


Рис. 4. Зависимость реактивного сопротивления на зажимах измерительного органа от однофазных КЗ от расстояния до места повреждения на КВЛ с кабельной вставкой в промежуточной точке ЛЭП

Таким образом, для идентификации повреждения на кабельном участке КВЛ может быть применён дистанционный орган от однофазных КЗ с передачей блокирующего сигнала на запрет АПВ. В случае применения кабельной вставки в начале ЛЭП или при нахождении кабельной вставки на расстоянии от начала ЛЭП и заземлении экрана вблизи центра кабеля возможна реализации избирателя повреждённого участка без применения дополнительной аппаратуры. При применении кабельной вставки, заземлённой с одной из сторон, запрет АПВ можно реализовать только с применением канала связи.

Литература

1. Овчинников, В.В. Автоматическое повторное включение. М.: Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.: ил. — (Библиотека электромонтёра; Вып. 587).
2. CIGRE Working Group B5.23. Short Circuit Protection of Circuits with Mixed Conductor Technologies in Transmission Networks: CIGRE technical brochure № 587. 2014. 241 p.
3. Приказ Минэнерго России от 15.01.2024 № 6 "Об утверждении Методических указаний по технологическому проектированию подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ" (Зарегистрировано в Минюсте России 01.07.2024 №78714).

УДК 621.314

Д.Г. ГРИГОРЬЕВ, аспирант

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

E-mail: denis.grigorev@mail.ru

Фильтрация аperiodической составляющей в сигнале тока от цифрового трансформатора тока

Аннотация. В работе рассматриваются 4 способа устранения аperiodической составляющей в сигнале, полученном от цифрового трансформатора тока. Приведено их теоретическое описание и сравнение по погрешностям вычислений и временным затратам.

Ключевые слова: аperiodическая составляющая, постоянная времени, цифровая обработка сигналов, катушка Роговского

D.G. GRIGORIEV, postgraduate student

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

E-mail: denis.grigorev@mail.ru

Filtering the aperiodic component in the current signal from a digital current transformer

Abstract. The paper examines 4 methods for eliminating the aperiodic component in a signal received from a digital current transformer. Their theoretical description and comparison by calculation errors and time costs are given.

Key words: aperiodic component, time constant, digital signal processing, Rogowski coil

Подавление аperiodической составляющей в мгновенных значениях тока является важной задачей для качественных измерений гармоник основной частоты сети. Для классических систем с ферромагнитными трансформаторами тока был разработан ряд алгоритмов, позволяющих устранить аperiodическую составляющую, например [1]. Для цифрового трансформатора тока эта задача становится более вариативной в области её решения, поскольку кроме мгновенных значений тока нам становятся доступны значения производной тока, измеряемые с помощью катушки Роговского. Разное отражение аperiodической составляющей в сигнале тока и производной тока, а также применение особых алгоритмов формирования вектора тока, как в [2], позволяют создать новые алгоритмы фильтрации. Отразим их на рис. 1, приняв N как число выборок на период, n – как отстающую выборку, k – как опережающую.

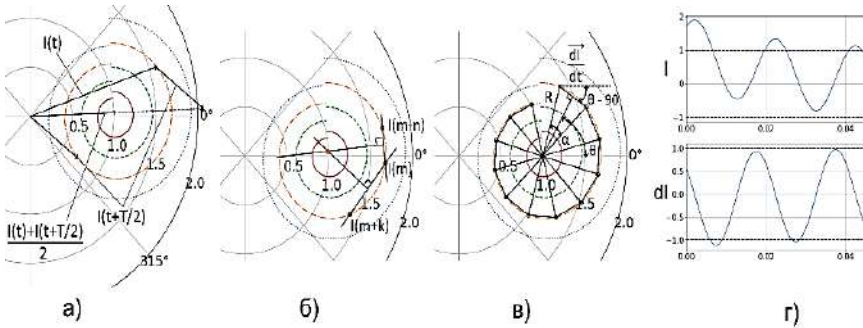


Рис. 1. Устранение аперииодики:

а) за полпериода б) по трём точкам в) по двум точкам и известной частоте дискретизации г) по разнице аперииодики в I и dI/dt

Устранение аперииодической составляющей в соответствии с рис. 1а,б производится по следующим уравнениям:

$$\frac{\overline{I(t)} + \overline{I(t + \frac{T}{2})}}{2} = \vec{I} + \varepsilon(A, t, \tau); \quad (1)$$

$$k_{xy+z} = \frac{\text{Im}(\overline{I[y+z]}) - \text{Im}(\overline{I[x]})}{\text{Re}(\overline{I[y+z]}) - \text{Re}(\overline{I[x]})},$$

$$\begin{aligned} \text{Re}(\vec{I} + \varepsilon(A, t, \tau)) = & \frac{k_{mm-n} \cdot k_{mm+k} \cdot (\text{Im}(\overline{I[m-n]}) - \text{Im}(\overline{I[m+k]}))}{2 \cdot (k_{mm+k} - k_{mm-n})} + \\ & + \frac{k_{mm+k} \cdot (\text{Re}(\overline{I[m-n]}) + \text{Re}(\overline{I[m]})) - k_{mm-n} \cdot (\text{Re}(\overline{I[m]}) + \text{Re}(\overline{I[m+k]}))}{2 \cdot (k_{mm+k} - k_{mm-n})}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\vec{I} + \varepsilon(A, t, \tau)) = & \frac{\text{Im}(\overline{I[m-n]}) + \text{Im}(\overline{I[m]})}{2} - \\ & - \frac{1}{k_{mm-n}} \cdot \left(\text{Re}(\vec{I}) + \text{Re}(\varepsilon(A, t, \tau)) - \frac{\text{Re}(\overline{I[m-n]}) + \text{Re}(\overline{I[m]})}{2} \right); \end{aligned}$$

Устранение аперииодической составляющей в соответствии с рис. 1в,г производится по следующим уравнениям:

$$R = \frac{\sqrt{(\operatorname{Im}(\operatorname{Im}[m]) - \operatorname{Im}(\operatorname{Im}[m-1]))^2 + (\operatorname{Re}(\operatorname{Im}[m]) - \operatorname{Re}(\operatorname{Im}[m-1]))^2}}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{N}},$$

$$\theta = \arctan\left(-\frac{\operatorname{Re}(\operatorname{Im}[m]) - \operatorname{Re}(\operatorname{Im}[m-1])}{\operatorname{Im}(\operatorname{Im}[m]) - \operatorname{Im}(\operatorname{Im}[m-1])}\right), \quad (3)$$

$$\bar{I} + \varepsilon(A, t, \tau) = \operatorname{Re}(\operatorname{Im}[m]) - R \cdot \cos\left(\theta - \frac{180^\circ}{N}\right) + j \cdot \left(\operatorname{Im}(\operatorname{Im}[m]) - R \cdot \sin\left(\theta - \frac{180^\circ}{N}\right)\right);$$

$$\tau = -\frac{I(t) + I\left(t + \frac{T}{2}\right)}{dI(t) + dI\left(t + \frac{T}{2}\right)}, \quad A = \frac{I(t) + I\left(t + \frac{T}{2}\right)}{\left(1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}\right)}; \quad (4)$$

В формулах (1)-(3) компонент ε представляет собой погрешность вычисления, связанную с затуханием аperiodической составляющей. Формула (4) позволяет вычислить аperiodическую составляющую без каких-либо погрешностей.

Проведём исследование погрешностей определения аperiodической составляющей, варьируя величину аperiodической составляющей A , постоянную времени τ , момент работы алгоритма t и количество выборок на период. Итоги сравнения изображены на рис. 2.

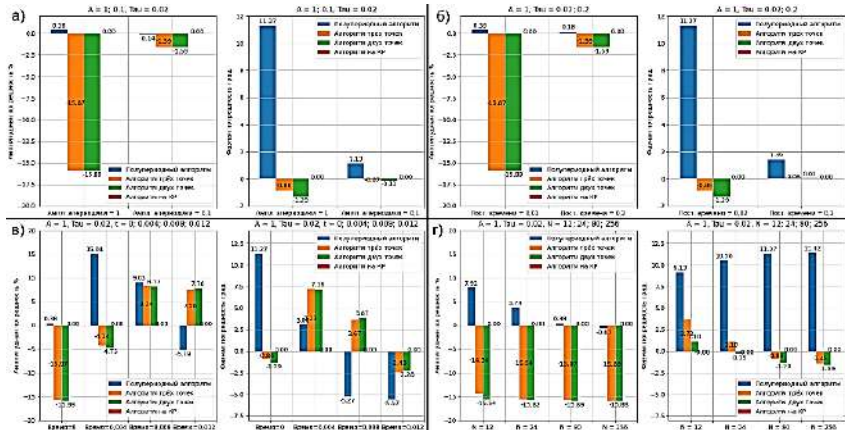


Рис. 2. Погрешности алгоритмов при изменении: а) $A = 1$; $A = 0,1$ б) $\tau = 0,02$; $\tau = 0,2$ в) $t = 0$; $t = 0,004$; $t = 0,008$; $t = 0,012$ г) $N = 12$; $N = 24$; $N = 80$; $N = 256$

Из рис. 2 можно сделать вывод, что четвёртый алгоритм на основе катушки Роговского не имеет погрешности, т.е. предпочтителен.

Выводы. В данной работе показаны 4 алгоритма устранения аperiodической составляющей и приведены сравнения погрешностей данных алгоритмов.

Литература

1. Алгоритм фильтрации аperiodической составляющей в сигнале тока короткого замыкания / Н.С. Бурянина, Е.В. Лесных, А.С. Лесных [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 2. С. 97-104. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-2-97-104. EDN QDFREN.
2. Лебедев В.Д., Григорьев Д.Г. Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения // Вестник ИГЭУ. 2024. № 2. С. 32-48. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048

УДК 621.314

Д.Г. ГРИГОРЬЕВ, аспирант

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

Фильтрация шумовой составляющей в сигналах токов и напряжений с применением нейросети

Аннотация. В работе рассматривается проектирование и тренировка нейронной сети (НС), предназначенной для фильтрации шумов в синусоидальных сигналах. Приведено теоретическое описание процессов выбора архитектуры и тренировки НС, а также смоделированы погрешности, возникающие в процессе фильтрации.

Ключевые слова: шумовая компонента, нейронная сеть, цифровая обработка сигналов, цифровой фильтр

D.G. GRIGORIEV, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34.
E-mail: denis.grigorev@mail.ru

Filtering the noise component in current and voltage signals using a neural network

Abstract. The paper considers the design and training of a neural network (NN) designed to filter noise in sinusoidal signals. A theoretical description of the processes of selecting the architecture and training the NN is given, and errors arising in the filtering process are modeled.

Key words: noise component, neural network, digital signal processing, digital filter

В задаче измерения сигналов довольно часто можно столкнуться с искажением сигнала вследствие наличия шумовой компоненты. Это могут быть как собственные шумы измерительной системы, так и наведе-

дённые извне помехи. Иногда можно наткнуться на источники шумов с определённым поведением, однако чаще всего приходится иметь дело со случайным шумом или с шумом, изменяющимся по настолько сложным закономерностям, что в первом приближении его можно считать случайным. Поскольку достоверно определить меру случайности шума не представляется возможным, для его устранения (частичного подавления) используются функции, оперирующие вероятностями. Так, одним из алгоритмов уменьшения среднеквадратичного отклонения выборок токов и напряжений является фильтрация Калмана [1].

Имеется ряд приёмов, позволяющих уменьшить влияние шумовой составляющей без оперирования вероятностями. Самым распространённым решением является установка фильтра нижних частот (ФНЧ), например, RC-фильтра. Это позволяет в значительной мере подавить высокочастотные составляющие. Минусом данного подхода является изменение в амплитуде и фазе сигнала, усиливающееся при приближении частоты среза фильтра к сетевой частоте. Другим решением может послужить применение преобразования Фурье для выделения полезных гармоник из зашумлённого сигнала. Однако это решение приведёт к влиянию высших гармоник шумовой компоненты на полученный результат.

Интерес вызывает использование нейросетей для подобной задачи, причём применение нейросетевого алгоритма в данном случае обусловлено обратной задачей. Известно, что нейросетевые алгоритмы умеют обобщать закономерности. В то же время зашумленный сигнал можно разложить на две компоненты – сама шумовая компонента, имеющая случайный характер изменения величины, а также гармоническая компонента, имеющая предсказуемое поведение. Предположение заключается в том, что нейросеть способна произвести декомпозицию сигнала благодаря выявлению периодической закономерности, отбросив случайные флуктуации сигнала.

Для проверки этого предположения была написана и натренирована нейронная сеть. Предполагается дальнейшее применение данной нейросети в терминалах релейной защиты, поэтому были приняты поправки на возможности микропроцессоров. В качестве архитектуры была принята модель однослойного перцептрона, поскольку она не создаёт значительной вычислительной нагрузки. Входными сигналами являются зашумлённые выборки тока. Поскольку в цифровых терминалах релейной защиты используется протокол SV для получения информации о токах, обучение проводилось с учетом этой особенности. Число выборок на период было выбрано как 80. Значения токов имеют 32 бита информации, как и предусмотрено протоколом. Однако, поскольку обучение велось с применением чисел с плавающей точкой, все выборки в процессе обучения были приведены к диапазону $[-1, 1]$. Выходным сигналом является предсказанное значение последней выборки тока без шумовой компоненты в диапазоне $[-1, 1]$. Для получения целочисленного значения производится обратное преобразование.

Для обучения сети использовался принцип обратного распространения ошибки, а также обучение с учителем. Для этого в процессе обучения производилось сравнение предсказанного значения нейросети с значением, полученным с незашумлённой синусоиды, после чего производилась коррекция весов связей входного и выходного слоя нейросети. В качестве функции активации была применена функция $f(x) = \sin(x)$ с ограничением x в пределах $[-\pi/2, \pi/2]$, поскольку входной сигнал изменяется по синусоидальному закону. Для малых значений x функция $\sin(x)$ имеет почти линейный характер. В общем виде процесс представлен на рис. 1.

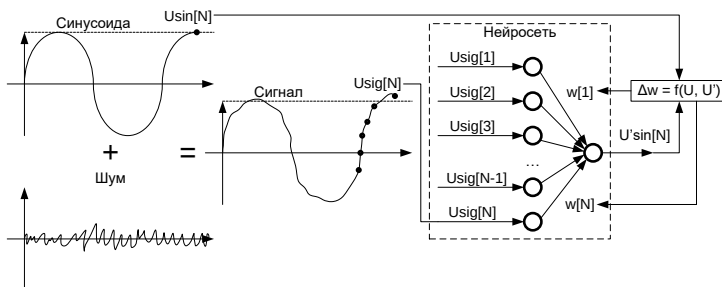


Рис. 1. Процесс обучения нейронной сети

Для проверки работы нейросети были проварьированы следующие параметры: 100 вариантов амплитуды синусоиды в логарифмическом масштабе в диапазоне от 1 до 10^9 , 201 вариант амплитуды шумов в логарифмическом масштабе в диапазоне 0.01 – 10000% от амплитуды синусоиды (1 – 100% для синусоиды с амплитудой $>10^7$), 360 вариантов начальной фазы сигнала. Дополнительно была проверена двойная фильтрация – процесс, когда выход нейросети подаётся на вход и снова подвергается фильтрации.

Были получены следующие результаты: начальная фаза сигнала не оказывает значительного влияния на работу алгоритма при любых значениях. При фиксации уровня шумов и варьировании амплитуды синусоиды, а так же при фиксации уровня амплитуды синусоиды и варьировании шумов замечено следующее: при малой амплитуде шумов ($< 1\%$) наблюдается завышение амплитуды синусоиды обоими алгоритмами. С ростом шумов результат однократного и двукратного алгоритма приближаются по значениям, и при превышении шумами уровня около 35% алгоритм двукратной фильтрации оказывается точнее однократного. Оба алгоритма выходят за пределы 10% погрешности при превышении шумами амплитуды синусоиды. В данном случае фильтрация улучшает сигнал, однако незначительно.

Выводы. В данной работе описан и показан процесс тренировки и проверки нейронной сети, предназначенной для фильтрации шумов. В результате выполнения работы было обнаружено, что данная нейросеть может оказаться полезной в случаях, когда сигнал имеет шумовую компоненту в пределах от 10 до 100% от амплитуды синусоидального сигнала.

Литература

1. Arun G. Phadke, James S. Thorp "Computer relaying for power systems" - Research studies press limited, A John Wiley and Sons, Ltd., Publication August. 2009, 344 p.

УДК621.314.22.08

Л.В. ВАЙТЕЛЕНОК, аспирант,
В.С. КОВЖЕНКИН, к.т.н., доцент,
Р.В. СОЛОПОВ, к.т.н., доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске,
214013, г.Смоленск, Энергетический проезд, 1
E-mail:larisa.vaytelenok.786@mail.ru

Анализ возможности построения фильтра тока нулевой последовательности на основе малогабаритных дистанционных измерительных преобразователей тока

Аннотация. Вработена основе компьютерного моделирования произведена оценка погрешности фильтра тока нулевой последовательности, построенного на базе малогабаритных дистанционных измерительных преобразователей. Показано, что при определенном выборе числа витков основных и компенсационных обмоток малогабаритного преобразователя с Н-образным магнитопроводом можно минимизировать небаланс фильтра без необходимости применения дополнительной балансировки.

Ключевые слова: релейная защита, измерительные преобразователи, нулевая последовательность, фильтр тока.

L.V.VAYTELENOK, postgraduate student,
V.S. KOVZHENKIN, PhD,
R.V. SOLOPOV, PhD

Smolensk Branch of the National Research University «MPEI»
214013 Smolensk, Energeticheskij proezd 1
E-mail:larisa.vaytelenok.786@mail.ru

Analysis of the possibility of constructing a zero-sequence current filter based on small-sized remote current measuring transducers

Abstract. Based on computer modeling, the error of the zero-sequence current filter, built based on small-sized remote measuring transducers, was estimated. It is shown that with a certain choice of the number of turns of the main and compensation

windings of a small-sized transducer with an H-shaped magnetic core, it is possible to minimize the unbalance of the filter without the need for additional balancing.

Key words: relay protection, measuring transducers, zero sequence, current filter.

Работа релейной защиты от замыканий на землю основана на контроле тока нулевой последовательности (НП) $\dot{I}_0$, который может быть вычислен в устройстве защиты по значениям трех фазных токов или получен непосредственно от фильтра тока нулевой последовательности (ФТНП). В качестве ФТНП чаще всего используется параллельное соединение вторичных обмоток трех фазных трансформаторов тока (ТТ). Однако значение тока НП может быть получено, используя и другие измерительные преобразователи, например, дистанционные измерительные преобразователи тока (ДИПТ)[1]. Особенно актуально рассмотрение ДИПТ в установках 110 кВ и выше за счет повышения стоимости и габаритов изоляции электромагнитных ТТ данного класса напряжения.

В качестве ДИПТ распространение получили магнитные трансформаторы тока, содержащие магнитопровод и измерительные катушки [2]. В отличие от электромагнитных ТТ, данные преобразователи не имеют непосредственного гальванического контакта с первичной цепью и первичной обмотки. Пониженный уровень изоляции по сравнению с требуемым значением обеспечивается также наличием расстояния между первичным проводником и ДИПТ не менее, чем изоляционное расстояние от токоведущих частей до заземленных конструкций.

Теоретические и практические аспекты построения ФТНП с использованием ДИПТ рассматривались в работах [1-3]. Для получения сигнала, пропорционального току НП, обмотки трех ДИПТ, установленных под каждым фазным проводником, соединяются последовательно. При этом напряжение $\dot{U}_{2\text{ФТНП}}$ на выводах такого ФТНП равняется сумме вторичных напряжений фазных ДИПТ:

$$\dot{U}_{2\text{ФТНП}} = j[(K_{Aa} + K_{Ab} + K_{Ac})\dot{I}_A + (K_{Ba} + K_{Bb} + K_{Bc})\dot{I}_B + (K_{Ca} + K_{Cb} + K_{Cc})\dot{I}_C], \quad (1)$$

где K - установочный коэффициент ДИПТ, пропорциональный сопротивлению взаимной индукции проводника с фазным током (первая буква в индексе коэффициента) и ДИПТ соответствующей фазы (вторая буква в индексе коэффициента); $\dot{I}$ - первичный ток соответствующей фазы.

Для получения с выхода данного ФТНП напряжения, пропорционального току $\dot{I}_0$, в работах [1-3] предложено обеспечить равенство сумм установочных коэффициентов для каждого фазного тока:

$$(K_{Aa} + K_{Ab} + K_{Ac}) = (K_{Ba} + K_{Bb} + K_{Bc}) = (K_{Ca} + K_{Cb} + K_{Cc}). \quad (2)$$

С учетом горизонтального расположения фазных проводников и обес-

печения равенства установочных коэффициентов ДИПТ крайних фаз ($K_{Aa} = K_{Cc}$, $K_{Ac} = K_{Ca}$, $K_{Ba} = K_{Bc}$), равенство (2) в симметричном трехфазном режиме достигается за счет уменьшения коэффициента преобразования ДИПТ фазы Впутем либо установки ДИПТ на большем расстоянии от проводника, чем ДИПТ крайних фаз [2], либо использования соответствующего делителя напряжения [1, 3]. Однако для такого ФТНП возможно появление напряжения небаланса при двухфазном режиме работы, достигающего 3–4% [2], что обусловлено несоблюдением равенства (2) в этом режиме. Помимо этого, за счет различия установочных коэффициентов ДИПТ средней и крайних фаз затруднено использование этих же ДИПТ для получения информации о фазных токах.

Для решения указанной проблемы в данной работе рассматривается вариант построения ФТНП с ДИПТ с одинаковыми параметрами без применения балансировки фильтра для выполнения условия (2). Пропорциональность выходного напряжения току НП с учетом допустимой погрешности предлагается обеспечить за счет использования ДИПТ с уменьшенными габаритами магнитопровода, и как следствие, сниженным влиянием на выходной сигнал отдельного ДИПТ токов проводников соседних фаз. В качестве прототипа рассматривается конструкция ДИПТ с H-образным магнитопроводом и двумя парами обмоток, размещенных на верхних (основные обмотки) и нижних (компенсационные обмотки) стержнях магнитопровода [3]. За счет встречного включения основных и компенсационных обмоток в результирующем вторичном сигнале такого ДИПТ минимизируется составляющая от токов других фаз.

Оценку возможных погрешностей в данной работе выполнена на основе моделирования в программе COMSOL Multiphysics 6.1. указанных ДИПТ для трехфазной электроустановки 110 кВ с расстоянием между фазными проводниками 2 м и расстоянием между ДИПТ и проводником 1 м. Высота стержней магнитопровода была принята 0,13 м. Поскольку компенсационная способность и погрешность рассматриваемого ДИПТ помимо размера магнитопровода, определяется также отношением числа витков основных и компенсационных обмоток, на основе решения модели при одинаковом числе витков всех обмоток, принятом равным 4000 витков, получены зависимости погрешности ДИПТ от токов соседних фаз (рис. 1).

Получено, что погрешность ДИПТ равна нулю как для ближней (кривая 1), так и дальней (кривая 2) фазы при определенных отношениях числа витков обмоток, однако, для дальней фазы минимум погрешности наблюдается для большей величины отношения, чем для ближней фазы. До достижения нуля погрешности имеют отрицательное значение, а после – положительное. Поэтому следует учитывать, что при симметричном трехфазном режиме, когда токи в проводниках одинаково направлены, погрешности от соседних фаз будут геометрически суммироваться (кривая 3), а при разнонаправленных токах,

например, при двухфазном замыкании, – вычитаться (кривая 4). Исходя из этого, минимальной погрешности отдельного ДИПТ в указанных режимах можно достичь, если выбрать отношение числа витков обмоток, соответствующее точке пересечения кривых 3 и 4 или нулевой погрешности от ближней фазы. Для приведенного примера это число равно 1,081, а максимальная погрешность при этом соответствует влиянию тока дальней фазы и не превышает 1,5 %.

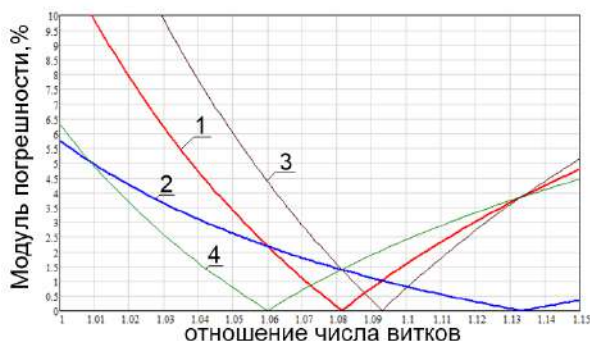


Рис. 1. Зависимости модуля погрешности ДИПТ фазы А от отношения числа витков основных и компенсационных обмоток:

- 1 – погрешность от ближней фазы; 2 – погрешность от дальней фазы;
- 3 – суммарная погрешность от токов соседних фаз при одинаковом направлении этих токов; 4 – суммарная погрешность от токов соседних фаз при разном направлении этих токов

Тогда максимальный расчетный небаланс ФТНП с рассматриваемыми ДИПТ соответствует трехфазному симметричному режиму и равен удвоенной максимальной погрешности ДИПТ, которая будет наблюдаться как для фазы А, так и фазы С. Однако за счет наличия сдвига фаз токов, погрешность ФТНП при моделировании составила 1,35 %. Также следует отметить, что при двухфазном замыкании между крайней и средней фазой погрешность ФТНП может быть несколько выше 1,5%. Это связано с тем, что, во-первых, даже при принятом отношении числа витков обмоток из-за необходимости округления до целого значения количества витков погрешность ДИПТ от тока ближней фазы не равна нулю; а во-вторых, из-за нелинейности характеристики намагничивания магнитопровода погрешность ДИПТ варьируется в зависимости от результирующего магнитного поля. Однако по результатам проведенного моделирования изменение погрешности в данном режиме не превышает 0,5%.

Выводы: проведенное исследование подтвердило возможность использования малогабаритных дистанционных измерительных преобразо-

вателей тока для создания фильтра тока нулевой последовательности. Уменьшение размеров магнитопровода преобразователя позволяет снизить небаланс ФТНП от токов соседних проводников до приемлемого для целей релейной защиты уровня, не превышающего 2%, за счет чего, не требуется применения дополнительной балансировки фильтра.

Литература

1. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. М. Киев: Наука думка, 1983.
2. Казанский В.Е. Измерительные преобразователи тока в релейной защите. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Ковженкин В.С. Исследование дистанционных трансформаторов тока применительно к релейной защите линий напряжением 110-220 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Москва-Смоленск, 1997. 185 с.

УДК 621.316.9

А.Е. ЕВДАКОВ, аспирант, рук. отдела РЗА ООО «АПС»,
Г.А. ФИЛАТОВА, к.т.н., доцент

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

Совершенствование алгоритмов функционирования восстановления нормального режима

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные подходы к совершенствованию алгоритмов функционирования восстановления нормального режима (ВНР). Показано, что в некоторых ремонтных режимах, а также при сложных аварийных процессах возможен отказ функционирования ВНР, приводящий в отдельных случаях к нежелательным отключениям оборудования подстанции или полному прекращению электроснабжения промышленного предприятия. Описаны методы предотвращения некорректной работы ВНР в указанных нестационарных режимах, а также предложены пути совершенствования алгоритмов существующих устройств ВНР.

Ключевые слова: ВНР, ОЗЗ, блокировка по углу, блокировка по частоте, контроль синхронизма, переток мощности.

А.Е. EVDAKOV, OL RPA LLC «APS»,
G.A. FILATOVA, PhD in Engineering sciences, associate professor

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

Improvement of algorithms for the restore normal mode function

Abstract. The article discusses current approaches to improving the operational algorithms of the Restore Normal Mode (RNM) function. It is shown that in certain

maintenance modes, as well as during complex fault conditions, incorrect operation of the RNM function may occur, leading in some cases to undesired substation equipment tripping or even a complete loss of power supply to an industrial facility. Methods for preventing incorrect RNM operation in such transient conditions are described, and ways to improve the algorithms of existing RNM devices are proposed.

Key words: RNM, single phase-to-ground fault, blocking by angle, blocking by frequency, synchronism check, power flow

Введение. С целью повышения надежности электроснабжения, сокращения времени перерыва питания потребителей и упрощения работы оперативного персонала [1,2] на современных подстанциях предусматривается наличие нескольких независимых источников питания. Для автоматического переключения между ними применяются функции автоматического ввода резерва (АВР) и восстановления нормального режима (ВНР).

Алгоритм АВР обеспечивает переключение питания секции шин, оказавшейся без питания (например, вследствие внешнего короткого замыкания с последующим отключением питающей линии электропередачи), на резервный источник питания, работа которого не была нарушена аварийным процессом. Восстановление исходной (нормальной) схемы электроснабжения осуществляется либо вручную оперативным персоналом, либо автоматически посредством функции ВНР.

Вследствие происходящего цифрового прогресса и возможности реализации сложных логических схем на микропроцессорных устройствах, были созданы быстрodeйствующие АВР (БАВР). Данные устройства способные обеспечивать переключения на резервный источник питания за десятки миллисекунд, что критически важно для технологических процессов в ряде отраслей промышленности. Современные терминалы БАВР, как правило, реализуют и функцию ВНР.

За последние десятилетия на энергообъектах внедрено значительное количество терминалов БАВР различных производителей, реализующих и функцию ВНР. Алгоритмы функционирования данных устройств, включая процессы ликвидации аварийных режимов и последующего восстановления нормальной схемы, претерпели существенные изменения. Ряд таких усовершенствований функционирования ВНР рассматриваются в данной статье далее.

Существующие требования к ВНР. Согласно требованиям нормативных документов [3] устройства ВНР должны обеспечивать контроль восстановления напряжения, отсутствие пуска или срабатывания токовых защит на вводах, а также отстройку от трёхкратного автоматического повторного включения (АПВ) на линиях.

Однако перечисленных условий может быть недостаточно для предотвращения некорректных переключений ВНР в ряде сложных режимов, которые могут привести к аварийным ситуациям или недопустимым перегрузкам оборудования, вызывающим последующие отключения.

Последовательный и параллельный ВНР.

На многих промышленных предприятиях применяется алгоритм параллельного ВНР, предусматривающий кратковременную параллельную работу источников питания. Такой подход позволяет обеспечить непрерывность питания для нагрузки в процессе переключений, однако, в отличие от алгоритма последовательного ВНР, он несет в себе риски развития аварийных ситуаций при определенных условиях, рассмотренных далее.

Блокировка по однофазным замыканиям на землю. Одним из первых усовершенствований, внедренных многими производителями [4,5,6,7], стала блокировка ВНР при возникновении однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Применяются различные варианты реализации данной блокировки

1) Блокировка при наличии ОЗЗ на обеих секциях шин. Данный алгоритм предотвращает возникновение междупазного короткого замыкания (КЗ) при включении на параллельную работу секций с ОЗЗ на разных фазах.

2) Блокировка при наличии ОЗЗ на любой из секций шин. Этот вариант дополнительно снижает риск возникновения ОЗЗ на ранее неповрежденной секции или перерастания существующего ОЗЗ в более тяжелый вид повреждения (например, двойное замыкание на землю).

Данная блокировка является стандартной для современных терминалов БАВР с функцией ВНР и позволяет предотвратить развитие очевидных аварийных режимов при ОЗЗ.

Блокировка при превышении угла. С целью ускорения срабатывания АВР (особенно при наличии мощной синхронной нагрузки, замедляющей снижение напряжения) в ряде терминалов БАВР, помимо контроля снижения напряжения, был внедрен пусковой орган по углу между векторами напряжений источников. Стандартные уставки срабатывания по углу для БАВР составляют 10-15°. Превышение этого значения обычно свидетельствует о наступлении аварийного режима.

Однако при проведении ремонтных работ, на ряде объектов угол между секциями может составлять 15-25°. Такое значение угла выходит за допустимые диапазоны, и даже применение адаптивных уставок доступных у некоторых производителей [4] не всегда исключает ложное срабатывание БАВР в подобных режимах.

До внедрения дополнительных блокировок в таких ситуациях наблюдались циклические срабатывания АВР–ВНР. Это происходило потому, что напряжение на вводах по модулю оставалось в пределах нормы, и после отработки выдержки времени готовности ВНР происходило восстановление нормальной схемы, что приводило к повторному срабатыванию БАВР по углу. Эксплуатирующему персоналу приходилось временно выводить из работы функции АВР и ВНР на период таких режимов.

Для решения данной проблемы были внедрены следующие две блокировки ВНР:

1) Блокировка ВНР по углу. Предотвращает срабатывание ВНР, если угол превышает заданное допустимое значение (значение должно быть меньше уставки пуска по углу).

2) Блокировка ВНР по числу срабатываний за определенный интервал времени. Предотвращает циклические переключения после их наступления.

Блокировка по частоте. Согласно ПУЭ [8] потребители первой категории должны обеспечиваться минимум двумя независимыми источниками питания. Однако в ряде случаев, в качестве такого независимого источника выступает собственная станция, и следовательно – частота и угол между секциями могут не совпадать. И если синхронизма по углу можно добиться, то существенная разность по частотам приведёт к тому, что данного условия будет недостаточно, так как двигательная нагрузка обладает большой инерцией и не может мгновенно разогнаться до 50 Гц. Это приводит к большим уравнительным токам и недопустимым электромеханическим переходным процессам.

Рассмотрим показательный случай несинхронного срабатывания ВНР, произошедший на одном из крупных промышленных предприятий с собственной генерацией. В результате внешнего короткого замыкания произошло отключение одной из питающих высоковольтных линий (ВЛ 220 кВ). Устройства БАРВ на подстанциях предприятия отработали штатно, переведя питание части потребителей на резервные источники, включая шины собственной генерации.

Данное событие привело к изменению режима работы локальной энергосистемы: часть оборудования предприятия начала работать изолированно от внешней сети, что сопровождалось снижением частоты (в рассматриваемом случае до 49,2 Гц) и потерей синхронизма с энергосистемой.

После восстановления напряжения на отключившейся ВЛ 220 кВ инициировалась работа автоматики ВНР на главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия. В момент попытки параллельного включения основного и резервного источников (внешняя сеть и собственная генерация) угол между их напряжениями достигал значительной величины (порядка 100°), а частоты существенно различались. Это вызвало большие уравнительные токи (пиковое значение достигало 16,2 кА, действующее значение – до 9,7 кА).

Возникшие сложные переходные процессы в электрической сети ГПП повлекли за собой излишнее срабатывание релейной защиты с последующим отключением второго силового трансформатора ГПП. Это привело к полному исчезновению напряжения на части распределительных устройств и аварийному останову подключенного к ним оборудования.

Предотвратить развитие описанной аварийной ситуации, приведшей к значительным технологическим нарушениям, могли бы следующие меры, реализуемые в ряде современных устройств:

1) **Блокировка по углу.** Благодаря тому, что зона допустимого срабатывания равная 30° (например, при уставке пуска по углу 15°) проходит в данном событии приблизительно за 0,11 с, то выдержка на готовность ВНР равная 10 с не успела бы набраться и не позволила бы сработать функции ВНР.

2) **Блокировка по разности частот.** При отклонении частоты между секциями на значение больше допустимого, блокируется работа автоматики ВНР на длительное время.

3) **Использование функции контроля синхронизма (ANSI 25).** Применение полноценного алгоритма проверки условий синхронизма (нахождение модулей, частот и взаимного угла напряжений в допустимом диапазоне) перед выдачей команды на выключатели для параллельной работы в цикле ВНР.

Уменьшение одновременного срабатывания ВНР. При наличии на одном объекте (например, крупном промышленном предприятии) множества терминалов БАПВ возрастает вероятность их одновременного срабатывания, что может приводить к значительным суммарным броскам тока при восстановлении нормальной схемы.

Если при функционировании логики БАПВ почти одновременная работа на разных присоединениях может быть обусловлена требованиями минимизации перерыва питания ответственных потребителей, то для функции ВНР синхронное срабатывание множества устройств не является необходимым и может быть нежелательным.

В ситуации, подобной рассмотренной выше (отключение внешней питающей линии главной понизительной подстанции), срабатывание БАПВ затрагивает значительное число присоединений на нижестоящих уровнях напряжения. После восстановления напряжения на основной питающей линии на всех задействованных устройствах запускается отсчет выдержки времени готовности ВНР. Зачастую на объекте устанавливается единая стандартная выдержка времени (например, 10 с) и одинаковое время параллельной работы (например, 0,2 с). Это приводит к практически одновременному срабатыванию множества ВНР, суммированию токов параллельной работы и, как следствие, к значительным перетокам мощности между источниками. Такое переключение, особенно при наличии других неблагоприятных факторов (например, начального расхождения угла между источниками), может вызвать превышение допустимых токов коммутационной аппаратуры или глубокие просадки напряжения в сети предприятия.

Для снижения негативного влияния одновременной работы ВНР рекомендуется в пределах одного энергообъекта применять селективность по времени срабатывания ВНР путем задания различных выдержек времени. Например, вместо единой уставки 10 с можно использовать

диапазон уставок от 9 до 11 с (или шире, в зависимости от объекта) с шагом, равным или несколько превышающим время параллельной работы (например, 0,2-0,5 с), распределяя их между различными группами устройств ВНР на объекте. Это обеспечит разновременность переключений и снизит пиковые нагрузки на сеть и оборудование.

Заключение. В работе представлены современные модернизации логики функционирования параллельного восстановления нормального режима для исключения включения на короткие замыкания и возникновения больших перетоков мощности, приводящих к аварийным отключениям, а также для уменьшения возникающих перегрузок во время переключений.

В статье рассмотрены актуальные усовершенствования алгоритмов функции параллельного ВНР, направленные на предотвращение некорректных срабатываний (в том числе включений на КЗ или несинхронную параллельную работу), способных вызвать значительные перетоки мощности и привести к аварийным отключениям. Внедрение блокировок по ОЗЗ, по углу между напряжениями источников, по разности частот, а также использование полноценного контроля синхронизма повышают надежность функционирования ВНР в сложных режимах. Кроме того, предложены способы снижения токовых нагрузок и перетоков мощности в процессе выполнения переключений ВНР за счет введения временной селективности между различными устройствами ВНР на одном объекте. Реализация описанных подходов позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей и предотвратить развитие аварийных ситуаций, связанных с работой автоматики ВНР.

Литература

1. СТО 59012820.29.020.002-2012. Стандарт организации. Релейная защита и автоматика. Взаимодействие субъектов электроэнергетики, потребителей электрической энергии при создании (модернизации) и организации эксплуатации. Текст : непосредственный.
2. СТО 56947007-29.240.10.028-2009. «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ». Москва. «Издательство НЦ ЭНАС». 2009;
3. Правила устройства электроустановок ПУЭ. 7-е изд. Гл. 3.3. Автоматика и телемеханика. Автоматическое включение резервного питания и оборудования (АВР). М.: Энергоатомиздат, 2002. 648 с
4. Руководство по эксплуатации. Микропроцессорное устройство быстродействующего автоматического ввода резерва с восстановлением нормального режима электроснабжения БАВР «МИР»/ АПДЛ.656121003 РЭ2. Редакция №2 от 10.07.2024, 217 с
5. Руководство по эксплуатации. БПВА.656121.007 РЭ, Реле автоматического ввода резерва «Сириус-АВР», редакция 1.02 от 08.12.2017. 63 с.
6. Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.082-12.01 РЭ, Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-БАВР-01, редакция от 27.04.202. 67 с
7. Руководство по эксплуатации. ЭКРА.656122.008/212 1301 РЭ. Терминал быстрого автоматического включения резерва с возможностью последующего

восстановления нормального режима энергоснабжения типа ЭКРА 212 1301, редакция от 26.02.2014. 70 с

8. Правила устройства электроустановок ПУЭ. 7-е изд. Гл. 1.2. Электроснабжение и электрические сети Категории электроприемников и обеспечение надежности электроснабжения (АВР). М.: Энергоатомиздат, 2002. 648 с

УДК: 621.314.224

Ю.Д. КУТУМОВ, к.т.н., доцент,
А.И. КУЛЕШОВ, к.т.н., доцент,
И.А. КУЛИКОВА, студент,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kutumov97@mail.ru, madmuasel.irinko@yandex.ru

О расчетах параметров нагрузочных режимов энергосистем для выбора параметров настройки устройств релейной защиты

Аннотация. К настоящему времени известно множество методик по обеспечению несрабатывания дистанционных измерительных органов в режимах без КЗ, таких как пуск и самозапуск электродвигательной нагрузки, броски тока намагничивания и пр. В АО «СО ЕЭС» с 2021 г. Успешно применяются Методические указания по отстройке дистанционных защит от предельных нагрузочных режимов работы энергосистем. Анализ указанного документа и приведенных в нем расчетных методик, выделение их преимуществ и недостатков – основная цель данной работы.

Ключевые слова: дистанционные защиты, нагрузочные режимы.

Yu.D. KUTUMOV, Ph.D., associate professor,
A.I. KULESHOV, Ph.D., associate professor
I.A. KULIKOVA, master degree student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kutumov97@mail.ru, madmuasel.irinko@yandex.ru

On calculation of power systems load modes parameters for calculation of relay protection devices settings

Abstract. At the present time, many methods are known for ensuring the non-operation of distance measuring devices in modes without short circuits, such as starting and self-starting of an electric motor load, magnetization current inrush, etc. Since 2021, JSC «SO UPS» has been successfully using the Guidelines for adjusting distance protection from maximum load modes of operation of power systems. The analysis of this document and the calculation methods provided in it, highlighting their advantages and disadvantages is the main goal of this research.

Key words: distance protection, load modes.

Введение. Для исключения ложного действия дистанционных защит (ДЗ) необходимо отстраивать их от нагрузочных режимов работы энергосистем. Нормативным документом, устанавливающим значения параметров электроэнергетического режима, которые используются для обеспечения отстройки устройств релейной защиты от нагрузочных режимов работы энергосистем, являются Методические указания по обеспечению отстройки устройств релейной защиты от нагрузочных режимов работы энергосистем [1]. Кроме того, в указанных Методических указаниях описаны методологические принципы выполнения расчетов по определению значений параметров нагрузочных режимов для отстройки устройств релейной защиты от нагрузочных режимов работы энергосистем.

О расчётах нагрузочных режимов работы энергосистемы. Для расчетов используется актуальная БРМ для того периода, для которого характерна наибольшая нагрузка рассчитываемого сетевого элемента. Моделирование режима осуществляется в ПК RastrWin.

Для моделирования ремонтной схемы и послеаварийного режима допускается суммарно не более трёх отключений сетевых элементов, при этом как отключение допускается не учитывать:

- отключение сетевого элемента (СЭ) в ходе работы противоаварийной автоматики;
- отключение системы (секции) шин;
- включение нормально отключенных сетевых элементов.

В ходе расчетов рассматриваются порядка двадцати режимов, соответствующих различным схемно-режимным условиям: анализируются различные комбинации наибольших и наименьших перетоков активной и реактивной мощности, протекающих в «прямом» и «обратном» направлениях, а также режимы с односторонним включением воздушных линий электропередач.

Необходимо выбрать верную траекторию утяжеления, опытным путем рассмотрев несколько вариантов. В противном случае, о неправильно выбранной траектории утяжеления будут свидетельствовать ошибки в программе: либо расхождение режима по количеству итераций (режим банально не имеет возможности существовать, и с помощью используемого метода Ньютона результат не достигим), либо по критериям, не свидетельствующим о достижении предельного режима, либо по верному критерию, но в районе, не прилегающем к району нахождения сетевого элемента.

Для утяжеления режима используются такие средства:

- изменение активной и реактивной мощности генераторов электростанций;
- изменение режимов работы средств регулирования реактивной мощности: шунтирующих реакторов, батарей статических компенсаторов и т.д.;

– изменение потребления активной мощности в энергорайоне и т.д.

Каждой вариации сочетания перетоков активной и реактивной мощности (например, P прямой; Q обратный) соответствуют четыре режима:

1. Предельный по статической устойчивости режим.
2. Режим, соответствующий нормативному запасу по статической устойчивости в послеаварийном режиме ($0,92 \cdot P_{\text{пред}}$).
3. Режим, соответствующий нормативному запасу по статической устойчивости в нормальном режиме ($0,8 \cdot P_{\text{пред}}$).
4. Режим, соответствующий наибольшей величине аварийно допустимой токовой нагрузки сетевого элемента. Очевидно, что наибольшему значению токовой нагрузки соответствует наименьшая температура наружного воздуха (-5°C). Допустимые токовые нагрузки ЛЭП и электросетевого оборудования указаны в десятом приложении к Положению по управлению режимами работы филиалов.

Для достижения режимов №2, 3, 4 (зачастую) применяется траектория «разутяжеления»: снижение перетока активной мощности по сетевому элементу до соответствующей величины. Важно отметить, что при уменьшении величины активной мощности изменяться будет и реактивная мощность. Таким образом, траекторию «разутяжеления» следует выбирать таким образом, чтобы минимизировать разницу в численных значениях реактивной мощности.

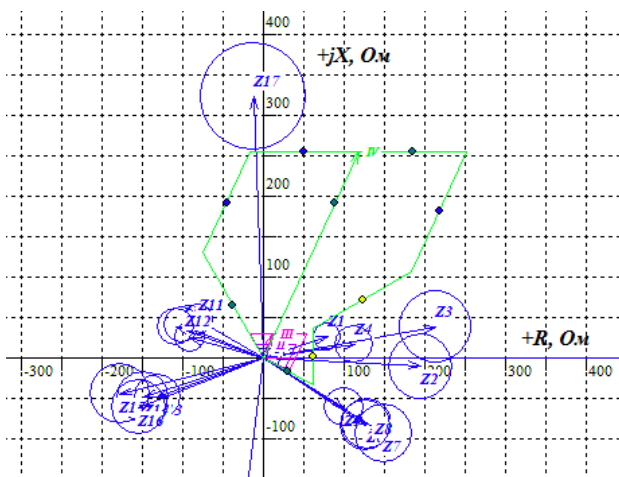


Рис. 1. Отстройка реле сопротивления от всех нагрузочных режимов

Некоторые особенности расчетов. Необходимо подчеркнуть, что по ряду причин некоторые из перечисленных режимов смоделировать

не удаётся. Например, при трёх отключенных элементах нет возможности достигнуть предельного режима, причем использованы все установленные ресурсы регулирования режима. В такой ситуации допускается осуществление иных мероприятий по утяжелению по согласованию с ИА «СО ЕЭС».

Кроме того, «развернуть» переток реактивной мощности в противоположном направлении с помощью располагаемых средств регулирования реактивной мощности также не всегда возможно, поэтому допускается рассматривать режим не с максимальным обратным перетоком, а с минимальным прямым и наоборот.

Помимо этого, стоит учесть случай, когда наибольшая величина АДТН численно больше тока в предельном режиме и достичь её при расчёте не является осуществимым. В данном случае допускается указывать «режим не существует» или «режим не достижим».

Выводы. Таким образом, расчёт параметров нагрузочных режимов работы энергосистемы является крайне важным мероприятием для правильной работы устройств релейной защиты. Отстройка дистанционной защиты от нагрузочных токов необходима по ряду причин:

- повышение чувствительности защиты за счёт наиболее точного описания характеристики срабатывания защит, что особенно важно для последних ступеней ДЗ;
- предотвращение ложных срабатываний релейной защиты в режимах работы сети при отсутствии повреждений;
- увеличение зоны действия защиты благодаря более точному описанию характеристики срабатывания (например, вырез полигональной характеристики в области нагрузки или смещение характеристики срабатывания в первый квадрант комплексной плоскости).

Однако, применение указанных методик в ряде случаев может снизить эффективность дальнего резервирования, которое должно осуществляться последними ступенями дистанционных защит.

Литература

1. Распоряжение АО «СО ЕЭС» №46р от 08.04.2019 г. «Методические указания по обеспечению отстройки устройств релейной защиты от нагрузочных режимов работы энергосистем»
2. Распоряжение АО «СО ЕЭС» №89р от 17.08.2021 г. «Методические указания по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит линий электропередачи 110 кв и выше»

УДК: 621.314.224

Ю.Д. КУТУМОВ, к.т.н., доцент,
М.И. ЦВЕТКОВ, студент,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kutumov97@mail.ru, maximtzv3tkov@yandex.ru

Исследование влияния броска намагничивающего тока силовых трансформаторов на устойчивость функционирования цифровых измерительных органов

Аннотация. Броски тока намагничивания (БТН) трансформаторов возникают в электрических сетях 0,4–750 кВ при подключении ненагруженного трансформатора к сети (при оперативных переключениях, при опробовании в цикле автоматического повторного включения и пр.). Для обеспечения несрабатывания устройств релейной защиты (РЗ) при возникновении БТН предпринимается ряд мер расчётного, конструктивного или алгоритмического характера. Алгоритмические способы отстройки от броска тока намагничивания включают в себя использование преобразования Фурье, введение блокировки по второй гармонике и пр. Тем не менее, в ряде современных расчётных методик по выбору параметров настройки основных и резервных защит энергообъектов для отстройки от БТН используются расчётные выражения из Руководящих указаний по релейной защите, полученные еще в 1970-е гг. для электромеханических реле. Основная цель указанной работы – проверка функционирования цифровых измерительных органов различного типа при БТН и обоснование актуальности/отсутствия актуальности применения упомянутых расчётных выражений.

Ключевые слова: силовой трансформатор, бросок тока намагничивания, цифровые измерительные органы

Yu. D. KUTUMOV, Ph.D., associate professor
M.I. TSVETKOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kutumov97@mail.ru, maximtzv3tkov@yandex.ru

Research of the influence of power transformers' magnetization current inrush on the operation stability of digital measuring devices

Abstract. Transformer magnetization current inrush (MCS) occur in 0.4-750 kV electrical networks when an unloaded transformer is connected to electrical network (during operational switching, testing in the automatic reclosing cycle, etc.). To ensure that relay protection devices (RP) do not operate when a MCS occurs, a number of measures of calculating, constructional or algorithmic nature are introduced. Algorithmic methods for tuning out the magnetization current inrush include the use of the Fourier transform, the introduction of second harmonic blocking, etc. Nevertheless, a number of modern calculation methods for selecting of main and backup protection

settings of power facilities to minimize MCS influence use calculation expressions from the Guidelines for Relay Protection, which were obtained in the 1970s for electromechanical relays. The main goal of this research is to check operation of digital measuring devices of MCS various types and to justify the relevance/lack of relevance of the mentioned calculation expressions usage

Key words: power transformer, magnetization current inrush, digital measuring devices.

Введение. Броски тока намагничивания (БТН) трансформаторов возникают в электрических сетях 0,4–750 кВ при подключении ненагруженного трансформатора к сети и сопровождаются появлением высших гармонических составляющих (прежде всего, 0-й, 2-й, 4-й и пр. чётных гармоник), а также значительной величиной действующего значения тока (рис. 1). Последнее приводит к искажению замеров токовых и дистанционных защит и может спровоцировать их ложное срабатывание в случае, если не предпринимать специализированных мер по отстройке защит от БТН.

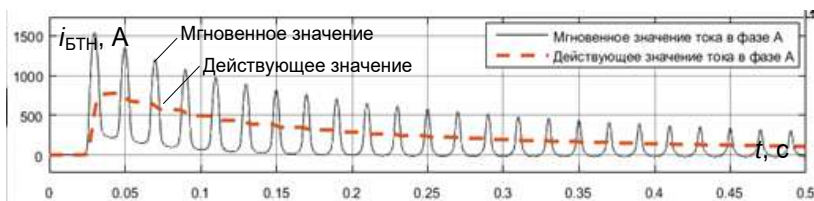


Рис. 1. Бросок намагничивающего тока (БТН)

Существуют как алгоритмические (преобразование Фурье, блокировка по 2-й гармонике и пр.), так и конструктивные (использование промежуточных насыщающихся трансформаторов), так и расчётные методы отстройки от БТН. Так, в [1, 2] присутствуют расчётные выражения, полученные для дистанционных реле на микропроцессорной элементной базе, но использующиеся в настоящее время для всех типов защит:

$$z_{с.з.} \leq C_6 \cdot (X_C + X_{тр. экв.}^{(1)}) - X_C, \quad (1)$$

где X_C – сопротивление питающей системы, $X_{тр. экв.}$ – сопротивление ЛЭП и трансформатора в режиме БТН, C_6 – коэффициент, зависящий от типа стали трансформатора и пр.

Цель исследования – проверка функционирования цифровых измерительных органов различного типа при БТН и обоснование актуальности/отсутствия актуальности применения мер алгоритмической и расчётной (параметрической) отстройки данных органов от БТН.

О ходе исследования. В ходе исследования были созданы имитационные модели измерительных органов (ИО) релейной защиты:

– измерительных органов тока токовой отсечки (ТО) I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} ;

- измерительных органов тока токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП) $3I_0$;
- измерительных органов направления мощности нулевой последовательности ТЗНП (разрешающее реле направления мощности нулевой последовательности - РНМр) $M_{0\text{разр}}$;
- измерительных органов сопротивления дистанционной защиты (ДЗ) Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA} .

Исследование функционирования ИО производилось при наиболее характерных типах включения (однофазное, двухфазное, трёхфазное), при различных режимах работы нейтрали трансформатора отпаечной подстанции (заземлена / не заземлена) и пр.

При исследовании замеров измерительных органов были рассмотрены два их варианта (дающие принципиально разные значения тока БТН): на основе преобразования Фурье и на основе анализа полного спектра тока (алгоритм двух выборок и пр.).

Результаты исследования. Произведенные исследования и расчеты показали, что:

- реле тока ТЗНП могут ложно сработать при БТН даже при использовании преобразования Фурье, поэтому требуется либо алгоритмическая, либо расчётная отстройка указанных реле от БТН;
- РНМр функционируют при БТН устойчиво;
- реле тока ТО, как правило, отстроены от БТН по току;
- реле сопротивления при использовании преобразования Фурье отстроены от БТН алгоритмически, в отличие от реле сопротивления, основанного на анализе полного гармонического спектра вектора тока (для которого требуется применение выражения 1).

В связи с этим для реле сопротивления в составе функций микропроцессорных защит использование выражения (1) [1] нецелесообразно.

Литература

1. Стандарт ОАО «СО ЕЭС» (СТО 56947007-29.120.70.032-2008) «Методические указания по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной и высокочастотной микропроцессорных защит сетей 220 кВ и выше, устройств АПВ сетей 330 кВ и выше производства ООО НПП "ЭКРА"». Утвержден и введен в действие 12.07.2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_parameter_choice.pdf [Дата обращения 31.10.2024].

2. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 09. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110-330 кВ. Москва, Энергия, 1972. – 115 стр.

УДК: 621.314.224

Ю.Д. КУТУМОВ, к.т.н., доцент
К.И. НАУМОВ, студент,
П.В. ШИРЯЕВА, студент.

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

E-mail: kutumov97@mail.ru, naumovkir77@gmail.com, polina20001111@gmail.com

О совершенствовании подходов к обоснованию применения устройств противоаварийной автоматики в энергорайонах с мощными электростанциями

Аннотация. До настоящего времени условия применения противоаварийной автоматики в энергосистеме, особенно в энергорайонах с мощными электростанциями, не были сформулированы достаточно точно. Тем не менее, к настоящему времени разработаны и опубликованы (либо готовятся к опубликованию) подзаконные акты и иные методические документы, грамотное и системное использование которых позволит чётко сформулировать, в каких случаях необходимо применять противоаварийную автоматику, а в каких – дополнительное сетевое строительство. Немаловажную роль в указанном процессе имеет планируемое принятие новой редакции Методических указаний по устойчивости энергосистем (2026 г.).

Ключевые слова: противоаварийная автоматика, нормативное возмущение, ремонтная схема, динамическая устойчивость

Yu. D. KUTUMOV, Ph.D., associate professor
K.I. NAUMOV, student
P.V. SHIRIAEVA, student

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

E-mail: kutumov97@mail.ru, naumovkir77@gmail.com, polina20001111@gmail.com

On improving approaches to substantiating the use of emergency control automatics in power districts with power stations of high capacity

Abstract. Until now, the conditions for the use of emergency control automatics in the electrical power system, especially in power districts with power stations of high capacity, have not been formulated with sufficient precision. However, by now by-laws and other methodological documents have been developed and published (or are being prepared for publication), the competent and systematic use of which will allow us to clearly formulate in which cases it is necessary to use emergency control automatics, and in which cases additional network construction is necessary. The planned adoption of a new version of the Guidelines for the Stability of Energy Systems (2026) plays an important role in this process.

Key words: emergency control automatics, reference incident, maintenance network configuration, dynamic stability.

Введение. К настоящему моменту известен ряд документов (нормативного и методического характера), описывающих условия применения устройства противоаварийной автоматики (ПА) в электроэнергетических системах (ЭЭС) [1, 2], а также требования к расчётам параметров электроэнергетических режимов для выбора указанных устройств [3, 4]. Исходя из анализа указанных документов, все существующие в РФ функции (устройства ПА) можно разделить на две группы: предусматриваемые в обязательном порядке (на ЛЭП определенного класса напряжения, определенной длины и пр.: АОСЧ, АОПН, АЛАР) и предусматриваемые только по анализам стационарных нагрузочных и электромеханических переходных процессов (АПНУ, АОСН, АОПЧ, АОПО).

Автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), которая, как правило, применяется в узлах с мощными электростанциями, подразделяется на три группы: АРО СГО (автоматика разгрузки при отключении сетевого и генерирующего оборудования), АРКЗ (автоматика разгрузки при коротких замыканиях), АРПМ (автоматика разгрузки при перегрузке по мощности).

О расчетах электрических режимов для обоснования применения ПА. В настоящее время выполняется внедрение в производственную деятельность АО «СО ЕЭС» Методических указаний по проектированию развития энергосистем [4], в п. 185, 200 и 201 явно или косвенно обозначаются условия ввода противоаварийной автоматики и/или мероприятия по повышению пропускной способности сети. Так, ввод новых устройств / комплексов ПА предусматривается при:

- нормативном возмущении (НВ) в нормальной схеме электрической сети в случае рассмотрения НВ, приводящего к отключению более одного элемента энергосистемы с учетом необходимости включения нагрузки потребителей электрической энергии, отключенной действием существующих и (или) проектируемых устройств ПА,

- единичной ремонтной схеме электрической сети в случае превышения максимально допустимого перетока активной мощности в контролируемом сечении, определяемого критериями послеаварийного режима (ПАР);

- НВ в единичной ремонтной схеме электрической сети,

- двойной ремонтной схеме электрической сети – в случае превышения максимально допустимого перетока активной мощности в контролируемом сечении, определяемого критериями ПАР;

- НВ в двойной ремонтной схеме электрической сети.

О корректировке Методических указаний по устойчивости энергосистем. При рассмотрении НВ целесообразно также обратиться к Методическим указаниям по устойчивости электроэнергетических систем [3], в которых описывается перечень используемых НВ.

Указанные нормативные возмущения делятся на 3 группы (III-я, наиболее тяжелая, не учитывается в ремонтных схемах) и для сети 500 кВ их перечень следующий:

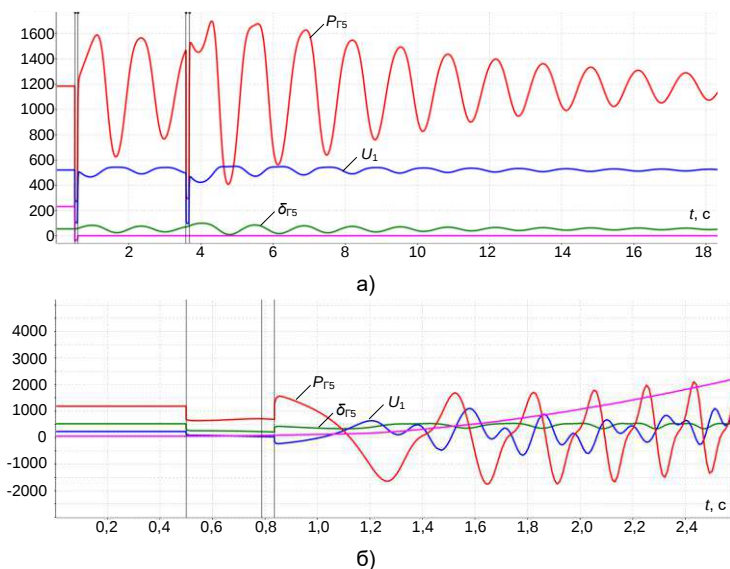


Рис. 1. Осциллограммы напряжения генератора ТЗВ-1200 (РГ5), напряжения прямой последовательности на шинах станции (U_1), угла ротора исследуемого генератора ($\delta_{Г5}$) (а – при НВ 1.1, б – при НВ 1.5, которое определяет в двойной ремонтной схеме необходимость применения АРЗКЗ, но отныне не будет)

- отключение сетевого элемента основной защитой при $K^{(1)}$ с неуспешным автоматическим повторным включением (АПВ) (1.1);
- отключение сетевого элемента резервной защитой (при невыполнении на сетевом элементе основной защиты) при $K^{(1)}$ с неуспешным АПВ (1.2);
- отключение сетевого элемента основной защитой при $K^{(1; 1)}$ с неуспешным АПВ (1.4);
- отключение сетевого элемента основной защитой при $K^{(1)}$ с отказом одного выключателя (1.5);
- отключение одной СШ основными защитами при $K^{(1)}$ (2.1);
- максимальный аварийный небаланс активной мощности, связанный с (3.1): отключением генератора; отключением генераторов энергоблока парогазовой установки; отключением генераторов атомной электрической станции, подключенных к одному реакторному блоку; снижением активной мощности солнечных электростанций; снижением активной мощности ветровых электростанций;
- отключение однополярной передачи постоянного тока (ППТ) или одного полюса биполярной ППТ (4.1);

- отключение одного модуля вставки постоянного тока (ВПТ) (4.2);
- отключение двух полюсов биполярной ППТ (4.3);
- отключение всех модулей ВПТ (4.4).

Согласно данным АО «СО ЕЭС», за период с 2016 по 2022 г., количество $K^{(1)}$ с УРОВ не превышает 1,2% от общего числа $K^{(1)}$; количество отключений при любых видах КЗ на СШ ежегодно не превышает 0,85% (для сравнения: ежегодно количество отключений при любых видах КЗ на ЛЭП и Т(АТ) достигает 62%); общее количество одновременных отключений двух ЛЭП на одних опорах в результате единичного возмущения не превышает 2,1% от общего количества отключений ЛЭП.

За 2016-2022 гг. было зарегистрировано 6 случаев работы АРБКЗ в ЕЭС России, 10 случаев работы АРЗКЗ, из которых 5 – неправильных. С учетом этого, АО «СО ЕЭС» к настоящему времени работает над новой версией Методических указаний (планируются к утверждению в 2026 г.), в которой (для сети 500 кВ) среди нормативных возмущений отсутствуют возмущения группы III, и присутствуют только возмущения 1.4, 1.2, 3.1, 4.1, 4.2, а также изменение активной мощности солнечных и ветровых электростанций.

Выводы. Таким образом, применение указанных выше документов (или их обновленных версий) приведет к:

- четкому ограничению перечней режимов, при которых необходимо применять новые устройства и комплексы ПА;
- уменьшению применения ПА на электростанциях с мощными энергоблоками, в особенности, устройств АРБКЗ и АРЗКЗ, предназначенных для сохранения динамической устойчивости, а также устройств и комплексов АПНУ в целом.

Литература

1. ГОСТ Р 55105-2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/731/73184.pdf> (дата обращения 20.08.21).

2. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 13.02.2019 г. № 101 "Об утверждении требований к оснащению линий электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики", 2019. 44 с. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_323625/ (дата обращения 07.04.25)

3. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 03.08.2018 № 630 "Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок "Методические указания по устойчивости энергосистем", 2018. 25 с. URL: <https://rg.ru/2018/09/01/minenergo-prikaz630-site-dok.html> (дата обращения 07.04.25).

4. Приказ Минэнерго России от 06.12.2022 №1286 (ред. от 12.07.2024) "Об утверждении Методических указаний по проектированию развития энергосистем и о внесении изменений в приказ Минэнерго России от 28 декабря 2020 г. N 1195" – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_436520/ (дата обращения 07.04.25).

УДК 621.311.24:621.313.12

В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,
А.Е. ПЕТРОВ, аспирант

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

Анализ и совершенствование существующих аппроксимаций для расчёта переходных процессов при самозапуске

Аннотация. Рассматривается анализ существующих аппроксимационных формул, применяемых при расчёте переходных процессов в асинхронных электродвигателях (АД) при самозапуске. Выявлены ограничения действующих методик и предложен подход к их корректировке для повышения точности расчётов. Приведены направления улучшения модели с учётом результатов моделирования, что позволяет повысить качество оценки режимов самозапуска в системах электроснабжения промышленных объектов.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, самозапуск, переходные процессы, имитационное моделирование, MATLAB.

V.D. LEBEDEV, Ph.D., associate professor,
A.E. PETROV, postgraduate student

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

Analysis and improvement of existing approximations for calculation of transient processes during self-start

Abstract. The paper analyzes existing approximation formulas used to calculate transient processes in induction motors during self-starting. Limitations of current methods are identified, and an approach for improving calculation accuracy is proposed. Model enhancement directions based on simulation results are outlined to improve the quality of self-starting assessments in industrial power supply systems.

Key words: induction motor, self-start, transient processes, simulation, MATLAB.

Введение. Расчёт самозапуска АД критически важен для надёжной работы систем электроснабжения промышленных предприятий. Одновременный самозапуск большого числа двигателей может вызывать перегрузки и повторные отключения. Используемые эмпирические

формулы нередко устаревают и не отражают современные характеристики оборудования, что снижает точность расчётов по существующим методикам [1].

Методика исследования. Для повышения точности расчётов предлагается проводить актуализацию аппроксимационных формул путём сравнения их результатов с паспортными характеристиками АД: $I_{\text{ном}}, M_{\text{ном}}, I_{\text{пуск}}, M_{\text{пуск}}, M_{\text{макс}}, \cos\varphi_{\text{ном}}, \sin\varphi_{\text{ном}}, S_{\text{ном}}, S_{\text{кр}}$. Такой подход позволяет скорректировать эмпирические зависимости с учетом конкретных параметров реальных машин, обеспечивая более достоверное моделирование переходных процессов при самозапуске. На основе анализа отклонений между расчетными и паспортными данными предлагается вводить поправочных коэффициентов и уточнение расчетных выражений.

Модель электродвигателя. В источниках [2-3] для описания переходных процессов в АД применяется схема, представленная на рис. 1а. Также в [3] подробно описан итерационный алгоритм расчета ее параметров с последующим определением пусковых характеристик АД: $I(s), M(s), P(s), Q(s), PF(s)$.

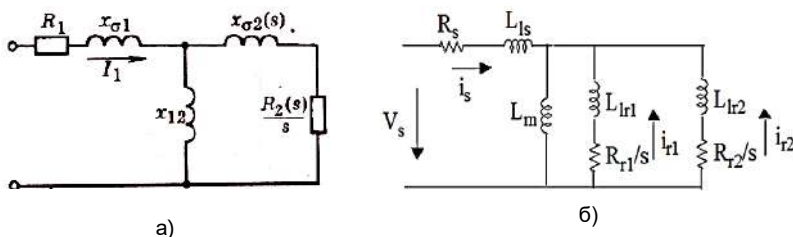


Рис.1. Схемы замещения ЭД:

а – схема замещения ЭД по [3]; б – схема замещения ЭД по [4].

Законы изменения параметров $R_2(s)$ и $X_2(s)$, определенные в [3]:

$$R_2(s) = R_{2C} + (R_{2\Pi} + R_{2C})\sqrt{s}; \quad (1)$$

$$X_2(s) = \frac{X_{2C} \cdot X_{2\Pi}}{X_{2\Pi} + (X_{2C} - X_{2\Pi})\sqrt{s}}, \quad (2)$$

где s – скольжение ротора ЭД; $R_{2C}(X_{2C})$ – сопротивления, соответствующие синхронному режиму ($s = 0$); $R_{2\Pi}(X_{2\Pi})$ – сопротивления, соответствующие режиму пуска ($s = 1$).

Схема замещения по рис.1а является упрощенной схемой, которая получается из рис.1б за счет параллельного сложения ветвей $R_{r1}/s + jL_{lr1}\omega$ и $R_{r2}/s + jL_{lr2}\omega$, подлежащих аппроксимации. Такое упрощение направлено на снижение вычислительной сложности, однако сопро-

вождается потерей точности, что особенно сказывается на расчётах пусковых характеристик АД. В рамках настоящей работы предлагается модификация существующих эмпирических формул, применяемых в упрощенной схеме:

$$R_2(s) = R_{2C} + (R_{2П} + R_{2C}) \cdot s^N; \quad (3)$$

$$X_2(s) = \frac{X_{2C} \cdot X_{2П}}{X_{2П} + (X_{2C} - X_{2П}) \cdot s^N}. \quad (4)$$

В ходе вычислительного эксперимента варьируется параметр N – показатель степени текущего скольжения ротора. Изменения производятся в диапазоне от 0,1 до 2. На основе полученных данных осуществляется подбор N , при котором минимизируется расхождение с паспортными данными.

Таблица 1. Зависимость относительной погрешности от значения варьируемого коэффициента аппроксимационной формулы

N	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1	1,2	1,5	2
$\delta_{\text{до 1кВ}}, \%$	36,3	21,6	14,9	9,7	3,6	1,4	0,9	0,6	0,56	0,6
$\delta_{\text{выше 1кВ}}, \%$	37,6	23,7	16,8	11,6	4,2	1,4	0,8	0,2	0,01	0,05

Вывод. Входе работы выполнен анализ влияния варьируемого параметра аппроксимационной формулы на точность расчета пусковых характеристик асинхронного электродвигателя. Путем подбора оптимального коэффициента удалось значительно снизить относительную погрешность расчёта пусковых характеристик. Это подтверждает возможность адаптации упрощённых моделей для повышения качества оценки самозапуска в инженерной практике. Результаты средней арифметической относительной погрешности (δ) по всем паспортным параметрам для двух АД напряжением до (4А355М2) и выше (ВА3-215/109-6АМО59) 1 кВ приведены в табл. 1.

Литература

1. Методика расчёта режимов перерыва питания и самозапуска электродвигателей 3-10 кВ собственных нужд электростанций упрощенными методами. М.: ОРГРЭС, 1992. 144 с.
2. Жуков В.В. Короткие замыкания в узлах комплексной нагрузки электрических систем /Под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Изд-во МЭИ, 1994. 224с., ил.
3. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. М.: Изд-во МЭИ, 1997. 424с., ил.
4. Pedra, Joaquin, "On the Determination of Induction Motor Parameters From Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs." IEEE© Transactions on Power Systems, vol.23, no.4, pp. 1709-1718, November 2008.

УДК 621.314

Д.С. ШАРЫГИН, аспирант;
Г.А. ФИЛАТОВА, к.т.н., доцент;
А.А. ЯБЛОКОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: sharyginds@yandex.ru, fgala90@mail.ru, andrewyablokov@yandex.ru,

Совершенствование алгоритма одностороннего определения места повреждения на воздушной линии электропередачи 110 кВ и выше

Аннотация. Статья посвящена исследованиям по повышению точности одностороннего алгоритма определения места повреждения (ОМП) по мгновенным значениям параметров аварийного режима (ПАР). Показаны результаты исследования влияния искажающих замер факторов и применения различных видов опорного тока в алгоритме ОМП.

Ключевые слова: определение места повреждения, мгновенные значения, параметры аварийного режима

D.S. SHARYGIN, postgraduate student;
G.A. FILATOVA, PhD, associate professor
A.A. YABLOKOV, PhD, associate professor

Ivanovo State Power Engineering University
34, Rabfakovskaya St., 153003 Ivanovo
E-mail: sharyginds@yandex.ru, fgala90@mail.ru, andrewyablokov@yandex.ru

Improving the one-sided fault location algorithm on overhead power lines of 110 kV and higher

Abstract. The article is devoted to the study of improving the characteristics of a one-sided fault location algorithm based on the emergency mode parameters at instantaneous values.

Key words: fault location, instantaneous values, emergency mode parameters

Введение. Большинство установленных на подстанциях микропроцессорных устройств с функцией ОМП реализует метод одностороннего замера, что продиктовано простотой применения таких устройств и отсутствием необходимости использования канала связи [1]. В соответствии с действующими стандартами эксплуатирующих организаций [2, 3] перед методами одностороннего ОМП по ПАР стоят задачи по обеспечению вспомогательного способа расчета расстояния до места повреждения, фиксации параметров аварийного режима (токов, напряжений, производных токов и др.) и участие в алгоритме экспресс-анализе развития аварии. Повышение точности дистанционного ОМП позволяет значительно сократить время на поиск места аварии, уменьшить фор-

мируемую зону обхода (критично важно для служб эксплуатирующих организаций) и, как следствие, финансовые затраты на проведение послеаварийных обходов.

Целью данной статьи являются повышение точности одностороннего алгоритма ОМП на основе замеров ПАР на мгновенных значениях при однофазных КЗ.

Исследуемый алгоритм ОМП. Алгоритм одностороннего ОМП был разработан в Ивановском государственном энергетическом университете (ИГЭУ, г. Иваново, Россия) [4, 5]. Применение данного алгоритма предполагает использование электронных измерительных трансформаторов для нивелирования инструментальной погрешности. Средством обработки результатов является интервальная оценка множества замеров места КЗ при переходе опорного тока через ноль, позволяющая исключить «некачественные» замеры.

Методические погрешности алгоритма. Выполненные ранее исследования алгоритма [4-5] показывают зависимости (погрешности ОМП) от основных влияющих на замер факторов: удаленность КЗ, переходное сопротивление в месте КЗ, взаимный угол между ЭДС эквивалентных систем, влияние нагрузки, сопротивления эквивалентных систем по прямой и нулевой последовательностям, удельные параметры ЛЭП, частота сети. Дополнительно проведены исследования таких факторов, как длительность КЗ, угол напряжения на поврежденной фазе в момент КЗ.

Алгоритм ОМП на основе мгновенных значений способен работать по данным аварийных осциллограмм с минимальной длительностью 10 мс (при наличии хотя бы одного перехода тока через ноль). Для оценки были проведены исследования алгоритма при различной длительности КЗ (от 20 мс до 100 мс). Алгоритм во всех моделируемых случаях (при различных сочетаниях других влияющих факторов) определяет место повреждения с одинаковой точностью, что дает основание сделать вывод, что алгоритм обладает преимуществом перед алгоритмами на векторных измерениях в скорости ОМП.

Фаза напряжения при КЗ не оказывает влияния на погрешность исследуемого метода ОМП. Получено, что апериодическая составляющая не оказывает существенного влияния на погрешность метода ОМП и является информационной для определения момента перехода опорного тока через ноль.

Использование опорного тока. Точность рассматриваемого метода ОМП напрямую зависит от определения правильного момента времени, при котором ток $3i_0(t)$ в месте повреждения проходит через ноль. Определение ОМП по $3i_0(t)$ в месте замера только с одного конца ЛЭП заведомо предполагает наличие погрешности, т.к. данный ток отличается от тока в месте повреждения как по величине, так и по фазовому сдвигу [6]. Использование в качестве опорного тока чисто аварийной состав-

ляющей тока в поврежденной фазе $ia(t) - ia_{pre}(t)$ вместо $3i0(t)$ дает существенное повышение точности исследуемого алгоритма ОМП (рис. 1).

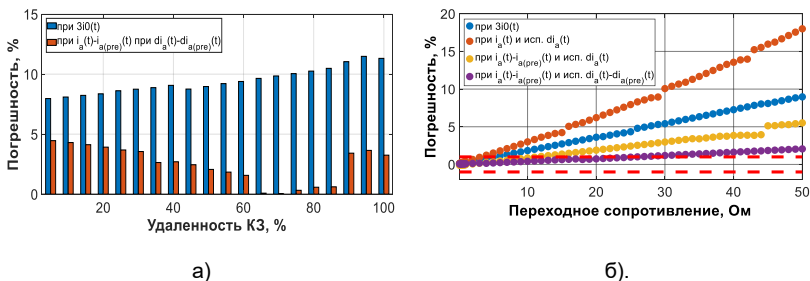


Рис. 1. Сравнение погрешностей метода ОМП при использовании различных опорных токов

Выводы. Проведены комплексные исследования, направленные на сокращение методической погрешности одностороннего метода ОМП по ПАР на мгновенных значениях. Показано, что преимуществом алгоритма является его быстроедействие при сравнении с методами ОМП на векторных измерениях. Отмечено, что отсутствует влияние фазы (угла) возникновения КЗ и апериодической составляющей в сигнале тока. В качестве опорного тока использовался фазный ток за вычетом его доаварийной составляющей, что позволило уменьшить относительную погрешность алгоритма дистанционного ОМП на 3-7% в условиях влияния большого переходного сопротивления в месте повреждения на линии с двухсторонним питанием.

Литература

1. Подшивалин А.Н., Исмуков Г.Н. Современный взгляд на ОМП по параметрам аварийного режима // Релейщик. 2014. № 3. С. 21- 25.
2. СТО 56947007-29.240.55.159-2013 Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше (с изменениями на 18.01.2016 и 20.12.2016). Дата введения: 28.11.2013. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2013. с.18
3. СТО 34.01-4.1-007-2018 Технические требования к автоматизированному мониторингу устройств РЗА, в том числе работающих по стандарту МЭК 61850. Дата введения: 23.03.2018. М.: ПАО «Россети», 2018. с.55
4. Yablokov, A. Methodology of a multifactorial automated research of fault location determination methods on EHV lines / A. Yablokov, G. Filatova, D. Sharygin // Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022 : 4, Moscow, 17–19 марта 2022 года. Moscow, 2022. P. 9731468. DOI 10.1109/REEPE53907.2022.9731468. EDN LDICPR.
5. Шарыгин, Д. С. Многофакторное автоматизированное исследование методов определения места повреждения на модели воздушной линии электропепе-

редачи 500 кВ / Д. С. Шарыгин, А. А. Яблоков, Г. А. Филатова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. № 4. С. 5-17. DOI 10.17588/2072-2672.2023.4.005-017. EDN SKUHUY.

6. Аржанников, Е. А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, В. Ю. Лукоянов, М. Ш. Мисриханов; под ред. В. А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.

УДК 621.316.925.1

А.А. ФОМИЧЁВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: aaf6@rambler.ru

Повышение эффективности защиты на апериодической составляющей тока для определения внутренних коротких замыканий на ЛЭП 6-10 кВ

Аннотация. В статье рассматриваются принцип действия защиты на апериодической составляющей тока КЗ ЛЭП 6-10 кВ, ее недостатки и методы повышения ее эффективности.

Ключевые слова: алгоритм, апериодическая составляющая, релейная защита, внутреннее КЗ.

A.A. FOMICHEV, Ph.D., Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34
E-mail: aaf6@rambler.ru

Improving the efficiency of protection on the aperiodic component of current for detecting internal short circuits on 6-10 kV transmission lines

Abstract. The article discusses the principle of operation of protection on the aperiodic component of short-circuit current on 6-10 kV transmission lines, its shortcomings and methods for increasing its efficiency.

Key words: algorithm, aperiodic component, relay protection, internal short circuit.

Теоретические основы защиты на апериодической составляющей тока для определения внутренних коротких замыканий на ЛЭП 6-10 кВ были изложены в [1]. Вкратце суть алгоритма защиты на апериодической составляющей тока заключается в следующем:

- выделение апериодической составляющей тока КЗ;
- расчет на ее основе угла δ между векторами ЭДС и тока КЗ (рис.1), являющегося арктангенсом отношения индуктивного и активного сопротивлений цепи;

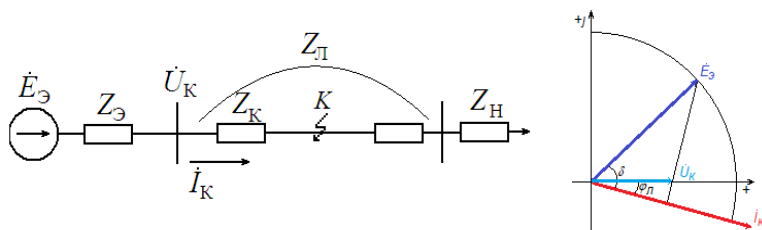


Рис.1. Эквивалентная схема и векторная диаграмма напряжений при КЗ

- выделение периодической составляющей тока КЗ;
- расчет на ее основе действующего значения тока КЗ;
- расчет модуля напряжения на шинах отходящей линии $\dot{U}_K$, а на

его основе сопротивления до места КЗ Z_K как

$$U_K = E_{\text{э}} \cdot \frac{\cos(\delta)}{\cos(\phi_n)};$$

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}.$$

Если модуль сопротивления Z_K меньше сопротивления линии Z_L , то КЗ считается внутренним.

При этом были приняты следующие допущения:

- сопротивление эквивалентной ЭДС $Z_{\text{э}}$ принимается индуктивным;
 - модуль эквивалентной ЭДС $\dot{E}_{\text{э}}$ принимается равным 1.05 номинального фазного напряжения сети;
 - частота напряжения и тока сети принимается равной строго 50 Гц.
- Чтобы исключить возможность работы защиты в режимах без КЗ, ее пуск должен осуществляться от токовой защиты (МТЗ), отстроенной от этих режимов.

На этапе моделирования работы защиты были выявлены ее основные недостатки:

1. Большое влияние на работоспособность защиты активного сопротивления системы и переходного сопротивления в месте КЗ.
2. Меньшая длина защищаемой зоны при двухфазных КЗ, чем при трехфазных.

Большие значения активного сопротивления системы и переходного сопротивления приводят к уменьшению угла между векторами эквивалентной ЭДС и тока КЗ, что приводит к увеличению модуля сопротивления Z_K и уменьшению сопротивления системы X_{Σ} .

Для уменьшения влияния активных сопротивлений предлагается ввести уставку минимального сопротивления системы $X_{\text{эмин}}$, которое может получено из максимального значения тока КЗ на шинах, к кото-

рым подключена защищаемая линия. Тогда, если модуль сопротивления Z_k окажется больше сопротивления линии Z_l , то предлагается рассчитать индуктивное сопротивление X_k до места КЗ

$$X_k = E_{\Sigma} \sin(\delta) / I_k - X_{\Sigma \min}$$

и сравнить его с индуктивным сопротивлением линии X_l . Если X_k получается меньше индуктивного сопротивления линии X_l , то КЗ считается внутренним.

При двухфазных КЗ меньшая длина защищаемой зоны обусловлена тем, что предложенный в защите метод расчета сопротивления до места КЗ в режиме двухфазного КЗ даст его значение Z_k в 2/1.73 выше и более. Поэтому самым простым способом увеличения длины защищаемой зоны при двухфазных КЗ является умножение полученного сопротивления на 1.73/2.

Предложенные методы повышения эффективности защиты на аperiodической составляющей нуждаются в экспериментальной проверке на имитационных моделях, что планируется в дальнейшем.

Литература

1. Фомичев А.А., Кожевников И.А. Использование аperiodической составляющей тока для определения внутренних коротких замыканий на ЛЭП 6-10 кВ / Материалы Международной (XXII Всероссийской) научно-технической конференции. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Бенардосовские чтения). Т. 3. Иваново: ИГЭУ, 31 мая–2 июня 2023 г. С. 391-394.

УДК: 621.314.224

Ю.Д. КУТУМОВ, к.т.н., доцент,
Д.Д. МАЛЬЦЕВ, студент.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kutumov97@mail.ru, madmuasel.irinko@yandex.ru

О совершенствовании подходов к выбору параметров настройки и логики действия устройств автоматического ограничения перегрузки автотрансформаторов

Аннотация. До настоящего времени выбор параметров настройки устройств автоматического ограничения перегрузки оборудования (АОПО) (линий электропередачи и автотрансформаторов) осуществлялся практически различно в каждом конкретном случае. Системность указанному мероприятию призваны придать «Правила определения логики действия и настройки устройств автоматического ограничения перегрузки оборудования», принятые в АО «СО ЕЭС» в 2024 г. В рассматриваемой работе отражены основные положения указанных Правил, а также приведено их внедрение в процесс дипломного проектирования.

Ключевые слова: перегрузка оборудования, автоматика ограничения перегрузки оборудования, автотрансформаторы.

Yu. D. KUTUMOV, Ph.D., associate professor
D.D. MALTSEV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kutumov97@mail.ru, madmuasel.irinko@yandex.ru

On improving approaches to selecting of settings and operational logic of automatic overload limiting devices of autotransformers

Abstract. Until now, the selection of the settings for equipment automatic overload limitation devices (AOLD) (of power lines and autotransformers) was carried out in almost different ways in each specific case. The "Rules for determining the logic of operation and setting up equipment automatic overload limitation devices", which was adopted by JSC «SO UPS» in 2024, are intended to give the specified event a systematic character. The work under consideration reflects the main provisions of the above mentioned Rules, and also provides their implementation in the process of master diploma design.

Key words: equipment overload, equipment automatic overload limitation devices, autotransformers.

Введение. Задачи, решаемые в рамках выбора параметров настройки и логики действия устройств АОПО. В настоящее время устройства (функции) АОПО и требования к ним отражены в ряде нормативных документов. Так, в [1] описаны общие требования к функции АОПО и их управляющим воздействиям, в [2] – рекомендуемые функциональные требования к АОПО, сформулированные в АО «СО ЕЭС». В СТО 59012820.27.100.001-2024 (АО «СО ЕЭС») [3], принятом в 2024 г., отражено новое видение в части формирования логики действия и выбора уставок АОПО. В [4] приведены требования к режимам работы автотрансформаторного оборудования, используемые при выборе уставок устройств АОПО автотрансформаторов (АТ).

В рамках выбора параметров настройки и логики действия АОПО последовательно решаются следующие задачи:

1. определение перечня режимов, при которых может потребоваться реализация управляющих воздействий (УВ) от АОПО АТ;
2. определение перечня факторов, ограничивающих величину и длительность токовой перегрузки защищаемого объекта (у АТ это может быть трансформатор тока, ошиновка и пр.);
3. на основе анализа схемно-режимной ситуации, доступных к реализации управляющих воздействий формулируются выводы о том, какие УВ АОПО АТ могут быть реализованы;
4. выбор параметров срабатывания и управляющих воздействий ступеней устройства АОПО;
5. оценка эффективности функционирования АОПО.

Некоторые принимаемые в [3] новые подходы к выбору параметров настройки и логики действия устройств АОПО. Согласно [3], количество ступеней АОПО должно определяться на основании информации:

- о допустимой величине и длительности перегрузки защищаемого элемента;
- видах, объемах, времени и эффективности реализации УВ, обеспечивающих снижение токовой нагрузки защищаемого элемента.

Для каждой ступени АОПО должны быть заданы одна или несколько выдержек времени на срабатывание.

Последующие рекомендации по выбору параметров настройки и логики действия устройств АОПО иллюстрируют некоторое изменение к назначению ступени АОПО и выбору ее выдержки (выдержек) времени. Если ранее различные ступени АОПО по току (при их количестве, превышающем 2, что наблюдается у АТ) реализовывали различные УВ, то отныне в [3] требуется для каждой ступени, действующей не на сигнал, задавать полный набор доступных УВ. Таким образом, ступень АОПО (токовый измерительный орган + набор выдержек времени) теперь предназначена не для реализации конкретного УВ, но для фиксации перегрузки определенной величины и длительности, что делает её назначение косвенно схожим со ступенью защит относительной селективности (которая фиксирует КЗ на определенной защищаемой зоне). Различные же УВ задаются внутри ступени и реализуются с различными выдержками времени, с интервалом, который определяется прежде всего скоростью реализации УВ (2...3 с).

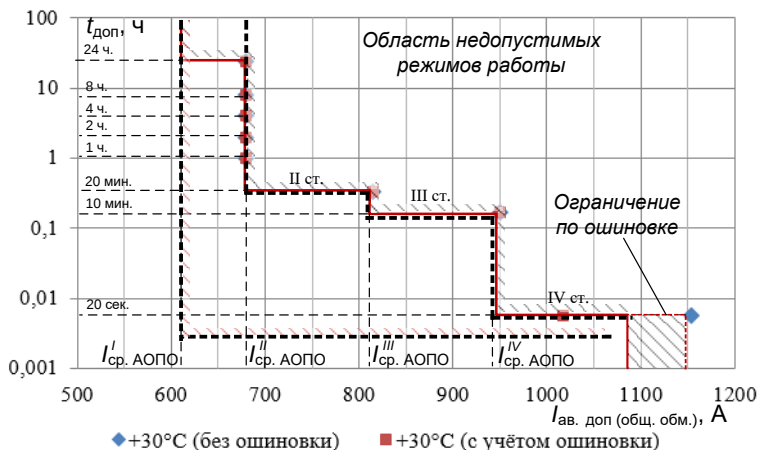


Рис. 2. Характеристика допустимых перегрузок АТ-1(2) ПС 500 кВ Вологодская при +30°C (летний период), наложенная на предварительно выбранные характеристики срабатывания АОПО

Выводы. Таким образом, изменяющиеся в настоящее время подходы к параметрированию АОПО призваны сделать данную функцию ПА более гибкой, а также в перспективе приведут к стандартизации выполнения АОПО в составе функций микропроцессорных устройств ПА.

Литература

1. ГОСТ Р 55105-2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/731/73184.pdf> (дата обращения 20.03.25).
2. ГОСТ Р 59384-2021 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования. Нормы и требования» URL: <https://megamorm.ru/Data/754/75466.pdf> (дата обращения 20.03.25).
3. Стандарт АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.27.100.001-2024 «Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Правила определения логики действия и настройки устройств автоматики ограничения перегрузки оборудования».
4. Требования к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики, и ее поддержанию, утвержденные приказом Минэнерго России от 08.02.2019 №81. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_321351/ (дата обращения 20.03.25).

УДК 621.316.925

К.С. АЛЁШИН, аспирант
А.А. СЁМУШКИН, аспирант,
Н.В. КУЗЬМИНА, ст.преподаватель,
Т.Ю. ШАДРИКОВА, к.т.н., доцент,
В.А. ШУИН, д.т.н., профессор

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

Принципы выполнения универсальной направленной защиты от замыканий на землю для кабельных сетей 6–10 кВ

Аннотация. Разработаны принципы выполнения универсальной направленной защиты от однофазных замыканий на землю для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, предназначенной для действия при всех их разновидностях.

Ключевые слова: компенсированные и некомпенсированные кабельные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, универсальная направленная защита от замыканий на землю.

K.S. ALESHIN, graduate student,
A.A. SEMUSHKIN, graduate student,
N.V. KUZMINA, senior lecturer,
T.Yu. SHADRIKOVA, Ph.D., associate professor,
V.A. SHUIN, D.Sc., Professor

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

Principles for the implementation universal directional protection against earth faults for 6–10 kV cable networks

Annotation. The principles for the implementation of universal directional protection against single-phase earth faults for compensated and non-compensated cable networks of 6–10 kV, designed to operate with all types of single-phase earth faults, have been developed.

Key words: 6–10 kV distribution cable networks, single-phase earth faults, directional earth fault protection, universal earth fault protection.

Введение. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются основным видом повреждений в электрических сетях среднего напряжения [1]. В сетях с изолированной нейтралью (в России ~78% кабельных сетей 6-10 кВ) и высокоомным заземлением нейтрали (~2%) наиболее широкое применение получили токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТЗНП и ТНЗНП), основанные на использовании составляющих промышленной частоты. В компенсированных сетях (~20%), как правило, применяются токовые защиты абсолютного замера высших гармоник (ВГ), а также направленные защиты на основе контроля направления мощности нулевой последовательности в переходных режимах ОЗЗ. В зарубежных странах достаточно широкое применение получили также направленные и ненаправленные адмитансные защиты, основанные на контроле проводимости нулевой последовательности.

Основным недостатком ТЗНП и ТНЗНП является не всегда достаточная селективность и чувствительность при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПЗЗ), сопровождающихся интенсивными переходными процессами. Также ТЗНП и ТНЗНП не предназначены для применения в сетях, работающих с компенсацией емкостного тока ОЗЗ.

Селективную фиксацию всех разновидностей ОЗЗ в сетях с различными режимами заземления нейтрали позволяют обеспечить защиты, основанные на использовании электрических величин переходного процесса при ОЗЗ. Однако, такие защиты не обладают непрерывностью действия при устойчивых ОЗЗ (УЗЗ).

Отметим также, что многообразие применяемых принципов выполнения защиты от ОЗЗ в сетях с различными режимами заземления нейтрали приводит к усложнению её проектирования и эксплуатации.

Учитывая изложенное, актуальной представляется задача создания универсальных защит от ОЗЗ, пригодных для применения как в компенсированных, так и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ.

Степень разработанности проблемы. Одним из перспективных направлений создания универсальных исполнений защиты от ОЗЗ является применение мультимастотного подхода построения, который предусматривает применение контроля в параметрах тока или напряжения нулевой последовательности не только основной гармоники, но и высших гармонических составляющих в заданном диапазоне частот. Это позволяет обеспечить селективность и высокую чувствительность защиты как при УЗЗ, так и при ДЗЗ.

ABB Finland предложена универсальная направленная адмитансная защита от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных электрических сетей среднего напряжения [2], основанная на использовании мультимастотного подхода к измерению проводимости нулевой последовательности. Недостатком данной защиты является то, что ее селективность в компенсированных сетях обеспечивается использованием малой активной составляющей остаточного тока ОЗЗ, точное измерение которой не всегда возможно, а также ограниченность рабочего спектра частот ВГ. Кроме ABB Finland других исполнений направленной мультимастотной защиты в кабельных сетях среднего напряжения как в России, так и других странах не используется.

Основные принципы построения универсальной направленной защиты от ОЗЗ (НЗЗ):

1. Ограничение «сверху» рабочего диапазона частот в токе и напряжении нулевой последовательности до 1,5-2 кГц, в пределах которого ВГ сохраняют практически чисто емкостный характер.

В указанном диапазоне при всех разновидностях ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью для неповрежденного и поврежденного присоединений выполняются соотношения [3]:

$$3i_{0\text{ неп}} = 3C_{0\text{ собс. неп}} \cdot u'_0; \quad (1)$$

$$3i_{0\text{ пов}} = -(3C_{0\Sigma} - 3C_{0\text{ собс. пов}}) \cdot u'_0, \quad (2)$$

где $3C_{0\Sigma}$, $3C_{0\text{ собс. неп}}$, $3C_{0\text{ собс. пов}}$ – соответственно суммарная емкость фаз на землю сети, собственные емкости фаз на землю неповрежденного и поврежденного присоединения.

Из (1) и (2) следует, что производную напряжения нулевой последовательности u'_0 можно использовать в качестве поляризующей величины направленной защиты, поскольку в неповрежденных присоединениях направления тока $3i_0$ и u'_0 всегда совпадают, а в поврежденном присоединении всегда противоположны. Тогда знак мгновенной мощности, рассчитанной по выражению:

$$P_0 = u'_0 \cdot 3i_0, \quad (3)$$

позволяет определить ее направление.

Чтобы исключить влияние погрешностей, возникающих в реальных условиях функционирования, и обеспечить непрерывный контроль направления мощности при ОЗЗ, расчет выполняется по выражению:

$$P_0 = \int_0^{T_{уср}} u_0'(t) \cdot 3i_0(t) \cdot dt, \quad (4)$$

где $T_{уср}$ - время усреднения, обеспечивающее непрерывность действия при УЗЗ и опасных ДПЗЗ.

2. Применение в компенсированных сетях для контроля направления мощности нулевой последовательности высших гармонических составляющих $3i_{0(BГ)}$ и $3u_{0(BГ)}$, для которых в диапазоне частот от 1,5-2 кГц справедливы соотношения (1) и (2). Учетом этого, в компенсированных сетях выражение (4) примет вид:

$$P_{0(BГ)} = \int_0^{T_{уср}} u_{0(BГ)}'(t) \cdot 3i_{0(BГ)}(t) \cdot dt. \quad (5)$$

3. В сети с высокоомным заземлением нейтрали через место повреждения и поврежденное присоединение, кроме емкостной составляющей тока ОЗЗ, протекает также и активная составляющая, обусловленная заземляющим резистором R_N :

$$3i_{0з} = -3C_{0\Sigma} \cdot u_0' - \frac{u_0}{R_N}; \quad (6)$$

$$3i_{0_{пов}} = -(3C_{0\Sigma} - 3C_{0_{собс.пов}}) \cdot u_0' - \frac{u_0}{R_N}. \quad (7)$$

Однако влияние активной составляющей на замер защиты в установившемся и переходном режимах ОЗЗ будет различным. Сопротивление высокоомного резистора выбирается из условия [4]:

$$R_N = \frac{1}{\omega \cdot 3C_{0\Sigma}}. \quad (8)$$

Указанные активная и емкостная составляющая тока в установившемся режиме сдвинуты друг относительно друга на 90° , что приводит к снижению чувствительности защиты в случае определения направления мощности по выражению (4).

В переходных же режимах ОЗЗ активная составляющая тока через место повреждения и поврежденное присоединение значительно меньше емкостной и не оказывает существенного влияния на замер защиты, который определяется выражениями (1) и (2).

Применение в качестве поляризующей величины тока через место повреждения позволяет повысить чувствительности защиты в установившемся режиме и не задавать уставку по собственной емкости присоединения. С учетом (8), выражение (6) примет вид:

$$3i_{0з} = -3C_{0\Sigma} \cdot (u_0' + \omega \cdot u_0). \quad (9)$$

Тогда, мгновенная мощность в сети с высокоомным заземлением:

$$P_{0(RN)} = \int_0^{T_{уср}} \left[u'_0(t) + \omega \cdot u_0(t) \right] \cdot 3i_0(t) \cdot dt. \quad (10)$$

4. Должна быть предусмотрена автоматическая замена мгновенной мощности, вычисленной по выражению (4), при установившемся режиме ОЗЗ в сети с высокоомным заземлением нейтрали на мгновенную мощность, вычисленную по выражению (10).

5. Выбор необходимого режима заземления нейтрали сети осуществляется в цепях формирования сравниваемых величин программным переключателем.

Структурная схема органа направления мощности универсальной НЗЗ. Структурная схема органа направления мощности универсальной НЗЗ, построенная на основе представленных выше принципов, приведена на рис. 1.

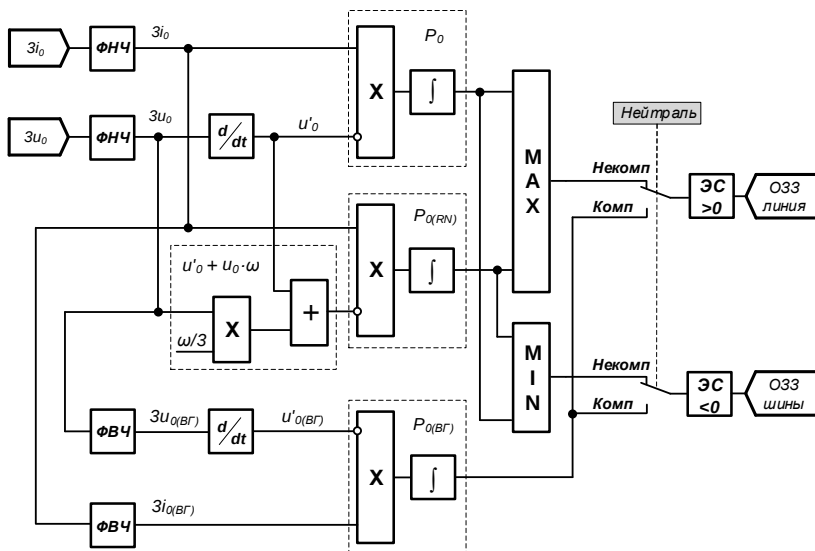


Рис. 1. Структурная схема органа направления мощности

Фильтр низких частот (ФНЧ) осуществляет подавление во входных сигналах тока и напряжения нулевой последовательности высокочастотных составляющих с частотой выше 1,5–2 кГц.

Фильтр высших частот (ФВЧ) осуществляет подавление составляющей основной частоты в сигналах тока и напряжения для дальнейшего расчета мощности по выражению (5).

Для удобства, канал поляризующей величины при расчете мощности по выражениям (4), (5) и (10) инвертируется таким образом, чтобы при повреждении на отходящем присоединении мгновенная мощность была положительной, а при внешнем ОЗЗ – отрицательной.

Переключатель режима заземления нейтрали обеспечивает подведение к элементу сравнения (ЭС) соответствующей мощности для компенсированных и некомпенсированных сетей.

Поскольку в установившемся режиме ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью будет выполняться соотношение $P_0 > P_{0(RN)}$, а в сети с высокоомным заземлением нейтрали: $P_0 < P_{0(RN)}$, в некомпенсированных сетях для определения внутреннего ОЗЗ выбирается максимальное значение между P_0 и $P_{0(RN)}$, а внешнего ОЗЗ - минимальное. Это позволит сохранить высокую чувствительности защиты при любом из перечисленных режимов заземления нейтрали.

Пуск универсальной НЗЗ производится при выполнении каждого из следующих условий:

- срабатывание пускового органа по действующему значению основной гармоники напряжения $3U_{0(50)}$;
- срабатывание пускового органа по среднеквадратичному значению тока $3I_0$.

Выбор уставок срабатывания пусковых органов осуществляется исходя из условия отстройки от небаланса токов и напряжений нулевой последовательности в режимах без ОЗЗ.

Заключение. Разработаны основные принципы выполнения универсальной направленной защиты от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных сетей 6-10 кВ, предназначенной для действия при всех их разновидностях.

Литература

1. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков // Энергетик. 2001. 104 с.
2. Wahlroos A., Altonen J. „Multifrequency admittance protection”, Wiadomości Elektrotechniczne, 12/2016.
3. Шадрикова Т.Ю. Разработка принципов выполнения комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6-10 кВ: автореферат дис...канд. техн. наук 05.14.02.Иваново, ИГЭУ, 2016.
4. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С. и др. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. - 272 с.

621.316.925.1

И.А. ГАЛАНИН, аспирант, инженер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
АО «РАДИУС-Автоматика»
E-mail: galanin@rza.ru

Влияние переходного сопротивления в месте ОЗЗ на параметры переходного процесса в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью

Аннотация. Приведены результаты анализа влияния переходного сопротивления в месте однофазного замыкания на землю на параметры переходного процесса в токе нулевой последовательности поврежденного присоединения в сети 6-10 кВ с изолированной нейтралью на основе аналитического решения дифференциального уравнения переходного процесса.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, переходный процесс при ОЗЗ

I.A. GALANIN, postgraduate student, engineer

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
JSC 'RADIUS-Automatica'
E-mail: galanin@rza.ru

Effect of transient resistance at the short-circuit fault location on transient parameters in 6-10 kV networks with insulated neutralisation

Abstract. The paper presents the results of analysing the influence of transient resistance in the place of single-phase earth fault on the parameters of the transient process in the zero sequence current of the damaged connection in the 6-10 kV network with isolated neutral on the basis of the analytical solution of the differential equation of the transient process.

Key words: single-phase earth faults, transient process at short-circuit faults

В современных условиях развития электроэнергетических систем особую актуальность приобретают вопросы обеспечения их надежности и устойчивости при различных аварийных режимах. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются наиболее распространенным видом повреждений в сетях с изолированной[1, 2]. Исследования влияния переходного сопротивления на параметры переходного процесса при ОЗЗ имеют важное практическое значение для разработки более эффективных методов релейной защиты и автоматики.

Целью настоящего исследования является комплексный анализ влияния величины переходного сопротивления в месте однофазного замыкания на основные параметры переходного процесса тока нулевой

последовательности поврежденного присоединения. Полученные результаты позволят усовершенствовать существующие алгоритмы релейной защиты и дистанционного определения места ОЗЗ (ДОМЗЗ).

Для анализа выбрана схема замещения сети с изолированной нейтралью включает в себя поврежденное и не поврежденное присоединения. Так как переходный процесс охватывает всю сеть одновременно учтена часть поврежденной кабельной линии за местом замыкания. Участки кабельной линии представлены Т-образной схемой замещения. Не поврежденное присоединение представляет эквивалентную внешнюю сеть с суммарным емкостным током сети I_{Σ} . Параметры схемы замещения КЛ рассчитаны по скорости распространения электромагнитной волны в канале нулевой последовательности [4].

С использованием эквивалентной схемы замещения посредством операторного метода было получено аналитическое выражение для определения переходного процесса тока нулевой последовательности ТТНП в поврежденной цепи. Верификация корректности полученного математического решения осуществлена путем сравнительного анализа с результатами моделирования аналогичной кабельной сети в программном комплексе Simulink, что позволило подтвердить адекватность разработанной математической модели.

Известно [2, 4], что в переходном процессе, возникающем при ОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения, можно выделить две стадии, различающиеся по частоте колебаний свободных составляющих токов и напряжений. Из аналитического выражения переходного процесса тока нулевой последовательности выделены зарядная и разрядные составляющие и представлены их зависимости кратность амплитуды относительно принужденной составляющей и частоты колебаний от величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ для трех мест замыкания на линии: при малом удалении от шин подстанции; в середине кабельной линии; вблизи шин противоположной ПС. Данные зависимости представлены на рис. 1.

Анализ данных демонстрирует, что при низких значениях переходного сопротивления (до 5 Ом) частоты зарядной и разрядной составляющих коррелирует с удаленностью точки однофазного замыкания от шин подстанции. Но при возрастании величины сопротивления в месте ОЗЗ частоты составляющих изменяются и при величине порядка 50 Ом слабо зависят от удаленности. При значениях переходного сопротивления свыше 100 Ом амплитуда зарядной составляющей демонстрирует тенденцию к асимптотическому убыванию.

Также выявлена высокочастотная составляющая, который характеризуется незначительной амплитудой при сопротивлении до 100 Ом. Однако при дальнейшем увеличении величины переходного сопротивления данная высокочастотная составляющая проявляет существенное влияние на характер переходного процесса, демонстрируя сопоставимость с разрядной составляющей по амплитудным характеристи-

кам. Зависимости кратность амплитуды относительно составляющей 50 Гц и частоты высокочастотной составляющей от сопротивления в месте ОЗЗ представлены на рис. 2.

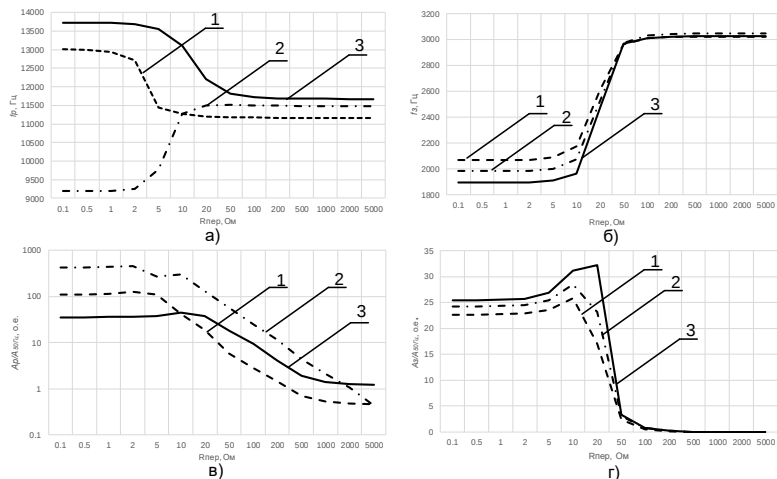


Рис. 1. Зависимости а) частоты разрядной составляющей, б) частоты зарядной составляющей, в) кратность амплитуды разрядной составляющей относительно составляющей 50 Гц, г) кратность амплитуды зарядной составляющей относительно составляющей 50 Гц от сопротивления в месте ОЗЗ: 1 – близкое замыкание; 2 – замыкание в середине линии; 3 – удаленное замыкание

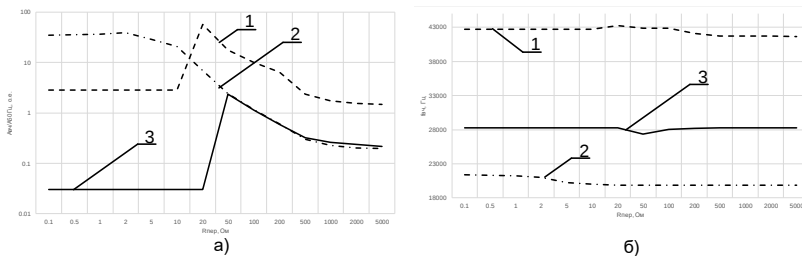


Рис. 2. Зависимости а) кратность амплитуды высокочастотной составляющей относительно составляющей 50 Гц, б) частоты высокочастотной составляющей от сопротивления в месте ОЗЗ: 1 – близкое замыкание; 2 – замыкание в середине линии; 3 – удаленное замыкание

Литература

1. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. 2005. № 3(33).
2. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс». 2001. 104 с.

3. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.
4. Шуин В.А., Кутумов Ю.Д., Кузьмина Н.В., Шадрикова Т.Ю. Выбор параметров моделей воздушных линий для расчетов переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ. 2021. Вып. 5. С. 5–17.
5. Кучумов Л. Переходное сопротивление в месте ОЗЗ / Леонид Кучумов, Антов Кузнецов, Денис Червочков // Новости Электротехники. (106). 2017. №4. С. 24-27.
6. Веселовский А.Н., Климов Н.А., Климов С.А. Влияние переходного сопротивления в месте замыкания на аварийные режимы фидера 35 кВ с трехобмоточным трансформатором // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. Кострома: КГСХА. 2012. Выпуск 79. 198с.

УДК 621.316

А.А. ЗИМИЧЕВА, магистрант,
В.А. ШУИН, д.т.н., профессор

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

Дуговые перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в кабельно-воздушных сетях 6–10 кВ

Аннотация. На основе исследований, выполненных с использованием имитационных моделей распределительных сетей напряжением 6–10 кВ, установлено, что на смешанных кабельно-воздушных линиях перенапряжения при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях могут достигать существенно больших значений, чем на кабельных или воздушных линиях данного класса напряжения. Исследовано влияние режима заземления нейтрали сети на эффективность ограничения дуговых перенапряжений на кабельно-воздушных линиях. Показано, что резонансное заземление нейтрали сети через дугогасящий реактор и высокоомное резистивное заземление нейтрали в смешанных кабельно-воздушных сетях менее эффективны в части ограничения дуговых перенапряжений, чем в кабельных или воздушных сетях.

Ключевые слова: распределительные кабельно-воздушные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, перенапряжения при дуговых перемежающихся замыканиях на землю.

A.A. ZIMICHEVA, undergraduate
V.A. SHUIN, D.Sc., Professor

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

ARC overvoltages during single-phase ground faults in 6–10 KV cable networks

Abstract. Based on the studies performed using simulation models of 6-10 kV distribution networks, it was found that overvoltages during intermittent single-phase arc faults

on mixed cable-overhead lines can reach significantly higher values than on cable or overhead lines of a given voltage class. The influence of the network neutral grounding mode on the efficiency of limiting arc overvoltages on cable-overhead lines was investigated. It was shown that resonant grounding of the network neutral through an arc-suppressing reactor and high-resistance resistive grounding of the neutral in mixed cable-overhead networks are less effective in limiting arc overvoltages than in cable or overhead networks.

Key words: 6-10 kV cable-overhead distribution networks, single-phase ground faults, overvoltages during intermittent arc faults to ground.

Введение. В России около 78% распределительных кабельных сетей 6-10 кВ работают с изолированной нейтралью, ~20% – с компенсацией емкостного тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) и ~2% – с резистивным заземлением нейтрали. Наиболее опасной разновидностью ОЗЗ в сетях, работающих с изолированной нейтралью, являются дуговые перемежающиеся замыкания (ДПЗЗ), максимальная кратность которых может достигать значений $K_{пер} = U_{макс}/U_{т.ф} = 3,5-4$ [1, 2]. При больших расстройках компенсации ДПЗЗ могут также возникать и в компенсированных сетях. В кабельных сетях с высокоомным заземлением нейтрали ОЗЗ могут иметь дуговой прерывистый характер, но не сопровождаются опасными перенапряжениями.

В сетях 6–10 кВ промышленного и пригородного назначения, кроме кабельных линий (КЛ), в некоторых случаях применяются также воздушные и комбинированные кабельно-воздушные линии (ВЛ и КВЛ). Исследования переходных процессов при ОЗЗ на имитационных моделях показали, что при дуговых замыканиях перенапряжения на КВЛ могут превышать перенапряжения на КЛ и ВЛ. В работе приводятся оценки максимальных кратностей дуговых перенапряжений на КВЛ и оценивается эффективность их ограничения при использовании различных режимов заземления нейтрали сети 6–10 кВ. Основным методом исследований является имитационное моделирование с применением библиотек пакета расширения SimPowerSystem (SPS) программного комплекса MATLAB.

Имитационная модель сети 6 кВ для исследования дуговых перенапряжений при ОЗЗ. Схема сети 6 кВ для исследования дуговых перенапряжений на КЛ, ВЛ и КВЛ приведена на рис. 1.

Сеть включает как КЛ и ВЛ, так и характерные для некоторых распределительных сетей 6–10 кВ промышленного и пригородного назначения КВЛ с различным числом и сочетаниями кабельных и воздушных участков. Принято, что ВЛ и воздушные участки КВЛ выполнены проводом А-50 (АС-50), КЛ и кабельные участки КВЛ – трехжильными кабелями с бумажно-пропитанной изоляцией с алюминиевыми жилами различного сечения (т.е. и с различными волновыми сопротивлениями) и варьируемой длиной. Предусмотрена возможность работы исследуемой сети 6 кВ с различными режимами заземления нейтрали (изолированная нейтраль, заземление нейтрали сети через дугогасящий реактор (ДГР) с различной степенью расстройки компенсации, высокоомное

резистивное заземление нейтрали, комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор).

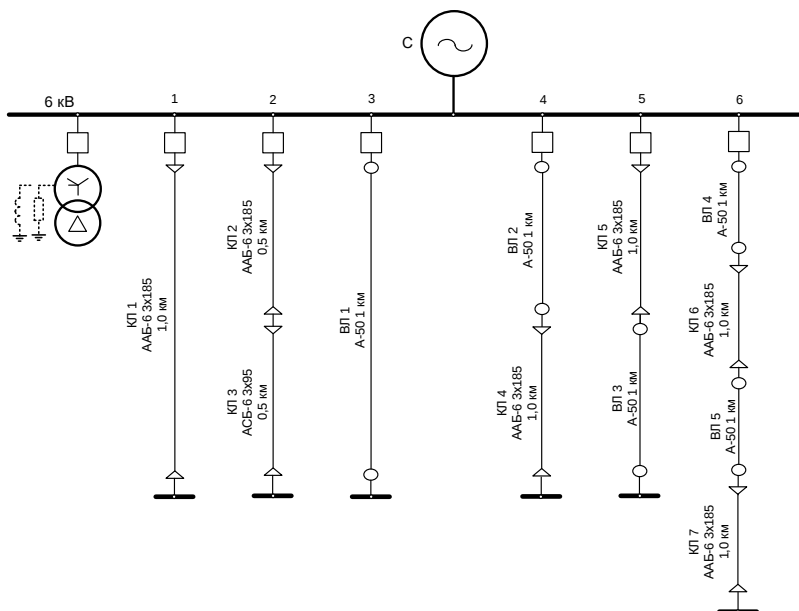


Рис. 1. Схема смешанной кабельно-воздушной сети 6 кВ для исследования дуговых перенапряжений на КЛ, ВЛ и КВЛ

Имитационная модель выполнена по схеме сети 6 кВ на рис. 1. Для моделирования КЛ, ВЛ и КВЛ используется блок Distributed Parameters Line SPS, предназначенный для имитации трехфазных линий с распределенными параметрами. Заданное значение суммарного емкостного тока исследуемой сети $I_{c\Sigma}$ обеспечивается подключением к шинам питающей системы С трехфазных RC-блоков Three Phase Parallel RLC Branch, имитирующих емкости и активные проводимости фаз на землю и между фазами. Схема модели включает также устройства измерения токов и напряжений (на рис. 1 не показаны).

Достоверность результатов, полученных на имитационной модели, обеспечивалась параметрированием КЛ и ВЛ в соответствии с рекомендациями [3, 4], а также настройкой элементов модели, обеспечивающей параметры электрических величин переходных процессов при зажигании и гашении заземляющей дуги (например, время разряда сети после гашения заземляющей дуги, постоянные времени затухания разрядной и зарядной свободных составляющих переходных токов и напряжений и др.), близкие к наблюдаемым при ОЗЗ в реальных сетях 6–10 кВ [например, 1].

Расчетные условия при исследованиях перенапряжений при ДПЗЗ. Известно, что максимальные перенапряжения в сетях с малыми токами замыкания на землю возникают ДПЗЗ, развивающихся по теории В. Петерсена [1, 2]. К факторам, оказывающим существенное влияние на величину перенапряжений на неповрежденных фазах сети, относятся также удаленность места повреждения от шин источника питания, индуктивность источника питания, определяющая ток трехфазного короткого замыкания (КЗ) на шинах, и переходное сопротивление в месте повреждения. С учетом этого при оценке максимальных перенапряжений в исследуемой сети по рис. 1 были приняты следующие расчетные условия:

– удаленность места ОЗЗ от шин $l_s \approx 0$ (замыкание вблизи шин);

– ток трехфазного КЗ $I_k^{(3)}$ на шинах имеет максимально допустимое

значение для подстанций с низшим напряжением 6 кВ ($I_{k \text{ макс}}^{(3)} < 20 \text{ кА}$);

– переходное сопротивление в месте ОЗЗ $R_n \approx 0$.

Результаты исследований перенапряжений в кабельно-воздушной сети с изолированной нейтралью. Расчетная точка ОЗЗ принята на фазе А, при этом максимальных значений перенапряжения достигают на опережающей фазе С. Значения перенапряжений оценивалась как на шинах источника питания, так и в конце каждой из линий.

Исследования показали, что на кабельных и воздушных линиях, состоящих как из одного участка (КЛ1, ВЛ1), так и из двух участков (КЛ2, КЛ3) максимальные кратности перенапряжений на фазе С, как на шинах, так и в конце линий, имеют значения $K_{\text{пер}} \approx 3,5$ (например, рис. 2). Такие же кратности перенапряжений наблюдаются на КВЛ5, состоящей из кабельного участка КЛ5 в начале линии и воздушного участка ВЛ3, подключенного за кабельным. Значительно возрастание кратности перенапряжений (до значений $K_{\text{пер}} \approx 4,5$, рис. 2) имеет место только на КВЛ4 и КВЛ6, на которых воздушный участок с большим волновым сопротивлением подключен перед кабельным участком, имеющим значительно меньшее волновое сопротивление.

Рассмотренный выше характер возникновения повышенных перенапряжений на КВЛ позволяет предположить, что их причиной являются переходные процессы, связанные с отражением и преломлением падающих со стороны шин источника питания волн напряжения в месте соединения воздушного и кабельного участков, обусловленные значительным различием их волновых сопротивлений (300-400 Ом для воздушных линий и десятки Ом для кабельных линий напряжением 6–10 кВ).

Влияние режима заземления нейтрали на перенапряжения в кабельно-воздушной сети. Исследования выполнялись для компенсированной сети при возможных в реальных условиях эксплуатации

значительных расстройках компенсации (до $\pm 20\text{--}25\%$ [2]) и сети, работающей с высокоомным резистивным заземлением нейтрали.

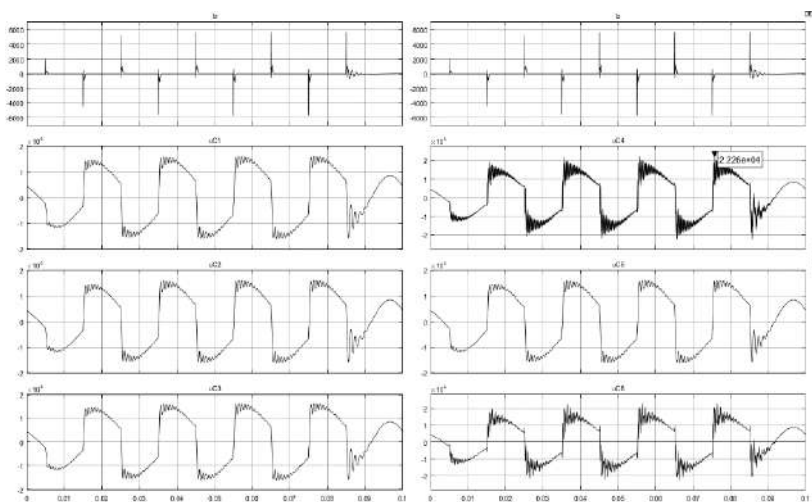


Рис. 2. Осциллограммы переходного тока в месте ДПЗЗ и перенапряжений на фазе С в конце линий:
 i_z – ток в месте повреждения; u_{C1} – u_{C6} – напряжения на фазе С в конце соответствующих линий сети по рис. 1

Исследования на имитационной модели компенсированной сети показали, что при больших расстройках компенсации, как и в сети с изолированной нейтралью, на КВЛ4 и КВЛ6 могут возникать перенапряжения, значительно превышающие расчетные значения для КЛ и ВЛ ($K_{\text{пер.макс}} \approx 2,6\text{--}2,8$ [2]). На имитационной модели сети в режиме перекompенсации ($I_L = 1,25 / c\bar{x}$) на КВЛ4 и КВЛ6 зафиксированы опасные перенапряжения с $K_{\text{пер.макс.}} \approx 3,3\text{--}3,4$. Для ограничения таких перенапряжений в принципе могут быть использованы ОПН, включенные в точках соединения кабельно-воздушного участка КВЛ.

Более эффективное ограничение перенапряжений на КВЛ4 и КВЛ6 при ДПЗЗ обеспечивает заземление нейтрали сети через высокоомный резистор $R_N = U_{\text{ф.ном}} / I_{c\bar{x}} - K_{\text{пер.макс.}} \leq 2,7\text{--}2,8$.

Заключение. На основе исследований, выполненных с использованием имитационной модели распределительной сети 6 кВ, установлено, что на КВЛ перенапряжения при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях по теории В. Петерсена могут достигать существенно больших значений, чем на кабельных или воздушных линиях. В

сети с изолированной нейтралью максимальные кратности перенапряжений на КВЛ составили $\sim 4,5$. Показано, что заземление нейтрали через ДГР при больших расстройках компенсации не обеспечивает эффективного ограничения максимальных перенапряжений на КВЛ, кратность которых может достигать значений до 3,3–3,4. Более эффективное ограничение дуговых перенапряжений на КВЛ обеспечивает высокоомное заземление нейтрали сети, уменьшающее кратность максимальных перенапряжений на кабельно-воздушных линиях $\sim 2,7$.

Литература

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. М.: Энергия. 1971. 152 с.
2. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С. и др. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений; под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 2001. 272 с.
3. Кузьмина Н.В. Выбор параметров моделей воздушных линий для расчетов переходных процессов при замыканиях на землю в сетях напряжением 6–10 кВ / Н.В. Кузьмина, Ю.Д. Кутумов, Т.Ю. Шадрикова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. 2021, Вып. 5. С. 5–17.
4. Кузьмина Н.В. Моделирование кабельных линий напряжением 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю // Н.В. Кузьмина, Ю.Д. Кутумов, Т.Ю. Шадрикова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. 2021, Вып. 5. С. 30–40.

УДК 621.316.925

К.С. АЛЁШИН, аспирант
А.А. СЁМУШКИН, аспирант,
В.А. ШУИН, д.т.н., профессор

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

Распределение ЭДС третьей гармоники для различных схем статорных обмоток синхронных генераторов

Аннотация. Получены кривые распределения ЭДС третьей гармоники для наиболее распространенных схем статорных обмоток turbo- и гидрогенераторов с использованием имитационной модели, выполненной в среде Simulink программного комплекса MATLAB. На основании данных кривых уточнены характеристики срабатывания и зоны действия существующей защиты двустороннего замера ЗЗГ-11 (БРЭ1301.01) и ее микропроцессорных аналогов.

Ключевые слова. синхронный генератор, однофазные замыкания на землю в обмотке статора, третья гармоника, защита от замыканий на землю.

K.S. ALESHIN, graduate students,
A.A. SEMUSHKIN, graduate students,
V.A. SHUIN, D.Sc., Professor

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

Distribution of the EMF of the third harmonic for various schemes of the stator windings of synchronous generators

Annotation. The distribution curves of the EMF of the third harmonic for the most common schemes of the stator windings of synchronous generators are obtained using a simulation model made in the Simulink environment of the MATLAB software package. Based on these curves, the actuation characteristics and coverage areas of the existing two-way metering protection ZZG-11 (BRE1301.01) and its microprocessor analogues have been clarified.

Key words: synchronous generator, single-phase ground faults in the stator winding, third harmonic, ground fault protection of the stator winding.

Введение. Для синхронных генераторов мощностью более 30 МВт, работающих в блоке с трансформатором, по требованиям ПУЭ необходимо применение 100%-й защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), охватывающей всю обмотку статора. По принципу действия, получившие наиболее широкое применение в России и других странах, 100%-е защиты от данного вида повреждений можно разделить на два типа, первый из которых основан на наложении на обмотку статора напряжения специальной формы, а второй – на контроле напряжений третьей гармоники ЭДС обмотки статора.

Известные исполнения защиты от ОЗЗ в обмотке статора генератора на основе контроля третьей гармоники ЭДС, не всегда обеспечивают достаточную селективность и чувствительность при изменениях нагрузки генератора. Это обусловлено существенной зависимостью ЭДС третьей гармоники от конструкции и режима работы генератора, а также применяемыми при разработке защит данного типа упрощенными представлениями о равномерном и линейном распределении последней вдоль обмотки статора [1, 2].

Исследование кривых распределения ЭДС третьей гармоники для различных схем статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов позволяет уточнить требования к характеристикам срабатывания и зонам действия как существующих, так и вновь разрабатываемых защит от данного вида повреждений. Основным методом исследований в работе является имитационное моделирование с применением разработанной модели, отражающей реальный характер поведения напряжения третьей гармоники в ЭДС с учетом режима работы и конструктивных особенностей синхронной машины [3].

Степень разработанности проблемы. Принципы действия существующих защит, чувствительных к замыканиям на землю вблизи нейтрали статора блочного генератора, основаны на использовании приближенных допущений о равномерном распределении емкостей фаз на землю и пропорциональности ЭДС третьей гармоники числу витков обмотки статора [4], т.е. предполагается, что векторы напряжений третьей гармоники со стороны нейтрали $\dot{U}_{3н}$ и линейных выводов генератора $\dot{U}_{3в}$, как в нормальном режиме, так и при ОЗЗ, всегда находятся в противофазе, а их модули в режиме без замыкания на землю равны, как показано на рис. 1, а.

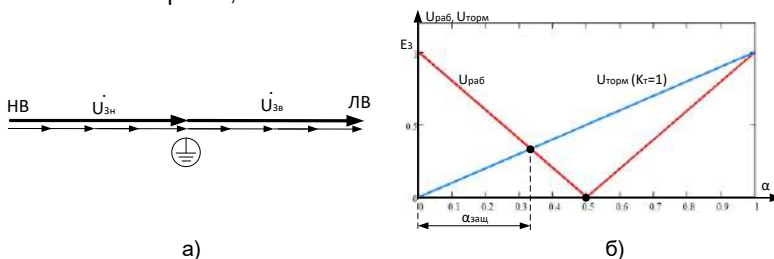


Рис. 1. Линейное распределение ЭДС третьей гармоники вдоль обмотки статора (а) и соответствующие данному распределению характеристики срабатывания и зоны действия $\alpha_{зав}$ защиты типа ЗЗГ-11 (БРЭ1301.01) (б)

Известно, что уровень ЭДС третьей гармоники значительно зависит от условий нагрузки и конструктивных особенностей генератора, поэтому наибольшее распространение получили защиты двустороннего замера, такие как ЗЗГ-11 и ее микропроцессорные аналоги, по принципу действия, отстроенные от изменений общего уровня третьей гармоники.

Условие срабатывания защиты ЗЗГ-11 имеет вид [5]:

$$U_{раб} = |\dot{U}_{3н} + \dot{U}_{3в}| \geq U_{торм} = K_t |\dot{U}_{3н}|, \quad (1)$$

где $U_{раб}$ и $U_{торм}$ – сравниваемые величины (рабочая и тормозная); K_t – коэффициент торможения.

Исходя из линейного распределения ЭДС третьей гармоники обмотки статора, показанного в векторном виде на рисунке 1, а, и условия срабатывания (1) получим характеристики срабатывания и зоны действия защиты, приведенные на рис. 1, б.

Распределение ЭДС третьей гармоники в турбогенераторах. В турбогенераторах (ТГ) наибольшее распространение получили двухслойные симметричные обмотки статора с фазной зоной 60 градусов с укороченным шагом, при этом генераторы мощностью более 63 МВт обычно выполняются с двумя параллельными ветвями обмотки статора [6, 7]. Число пар полюсов турбогенераторов может составлять одну или две.

На рис. 2,а приведена полученная на имитационной модели кривая распределения ЭДС третьей гармоники для двухполюсного ТГ с одной ветвью обмотки статора, на рис. 2,б – соответствующие данной кривой характеристики срабатывания и зоны действия защиты 3ЗГ-11 (БРЭ1301.01) при коэффициенте торможения $K_T = 1$.

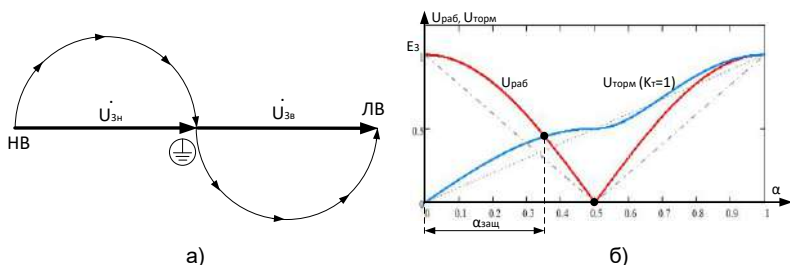


Рис. 2. Распределение ЭДС 3-ей гармоники для двухполюсного ТГ с двухслойной симметричной обмоткой с фазной зоной 60 градусов (а) и соответствующие данному распределению характеристики срабатывания и зоны действия $\alpha_{заш}$ 3ЗГ-11 (б)

Кривая распределения ЭДС третьей гармоники представляет собой две зеркально отраженных и соединенных последовательно дуги величиной 180 градусов, которые соответствуют двум фазным зонам статорной обмотки. Величина дуги для любой гармоники ЭДС статора, включая основную, соответствует произведению величины фазной зоны и номера рассматриваемой гармоники [8]:

$$\alpha_v = v \cdot \alpha_{фз}, \quad (2)$$

где $\alpha_{фз}$ – величина фазной зоны, v – номер рассматриваемой гармоники.

Отметим, что соответствующие рассматриваемой кривой распределения ЭДС третьей гармоники характеристики срабатывания и зоны действия защиты 3ЗГ-11 (рис. 2,а) в целом достаточно хорошо коррелируют с характеристиками, приведенными для линейного распределения третьей гармоники, показанными на рис. 1,б.

Турбогенераторы, выполняемые с двумя параллельными ветвями статора, будут соответственно иметь две кривые распределения третьей гармоники. Для наиболее распространенных схем статорных обмоток с направлением намоток катушек во всех фазных зонах в одну сторону эти кривые зеркально отражены, образуя окружность, в центре которой в нормальном режиме без ОЗЗ расположен потенциал земли.

Как видно из рис. 3, б защита 3ЗГ-11 при коэффициенте торможения $K_T = 1$ в идеализированном случае (без учета погрешностей функционирования защиты) позволяет охватить всю обмотку статора.

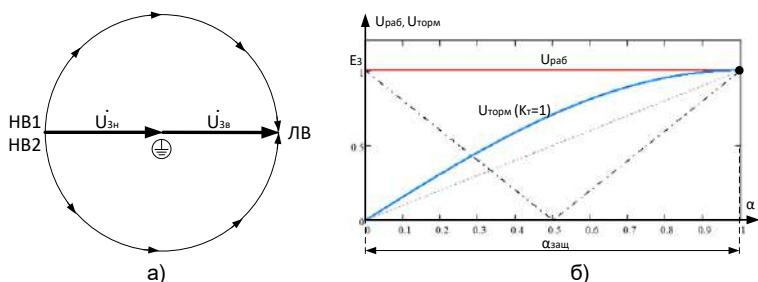


Рис. 3. Распределение ЭДС 3г для двухполюсного ТГ с двумя параллельными ветвями статора с двухслойной симметричной обмоткой с фазной зоной 60 градусов (а) и соответствующие данному распределению характеристики срабатывания и зоны действия $\alpha_{заш}$ ЗЗГ-11 (б)

Для более редко используемой схемы статорной обмотки с двумя параллельными ветвями с перекрещиванием в лобовых частях кривые распределения третьей гармоники параллельны (наложены друг на друга) и образуют полуокружность (рис. 4).

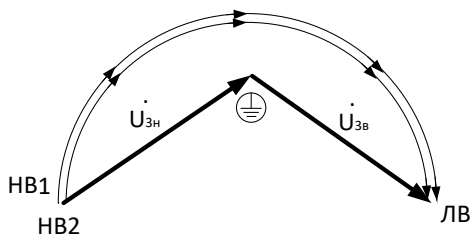


Рис. 4. Распределение ЭДС 3-ей гармоники для двухполюсного ТГ с двумя параллельными ветвями и перекрещивающейся обмоткой статора

Такая асимметрия приводит к тому, что потенциал земли в режимах без ОЗЗ смещен относительно отрезка, связывающего линейные (ЛВ) и нулевые выводы (НВ) генератора. В результате угол между векторами $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$ составляет 120 градусов, а не 180, что обуславливает наличие значительного напряжения небаланса для защиты ЗЗГ-11 в режимах без замыканий на землю, что будет вызывать ложное срабатывание последней при $K_m < 1,15$. В режимах с ОЗЗ характеристики и зоны действия защиты в рассматриваемом случае соответствуют рис. 3, б.

Для несимметричных, дробных, а также статорных обмоток с фазной зоной 120 градусов выявлена нестатичность форм кривых распределения третьей гармоники, приводящая к изменению соотношения

напряжений третьей гармоники на линейных выводах и нейтрали генератора в установившихся режимах без ОЗЗ.

Распределение ЭДС третьей гармоники в гидрогенераторах. Как правило, гидрогенераторы имеют большое количество пар полюсов (до нескольких десятков) и выполняются с волновыми обмотками, которые могут иметь как целое число пазов на полюс и фазу, так и дробное [9].

Один многополюсный гидрогенератор можно представить как совокупность соединенных последовательно двухполюсных машин, из чего следует, что и кривые распределения третьей гармоники последовательно повторяются кратно числу пар полюсов. Таким образом, результирующее распределение третьей гармоники в гидрогенераторах является практически линейным. Кроме того, уровень генерируемой третьей гармоники в гидрогенераторах, выше, чем в турбогенераторах, что повышает селективность и устойчивость функционирования защит от ОЗЗ статора, выполненных на основе контроля третьей гармоники ЭДС генератора.

Заключение. С использованием имитационной модели, учитывающей режим работы и конструктивные особенности синхронной машины, получены кривые распределения ЭДС третьей гармоники вдоль обмотки статора для различных схем статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов, позволившие уточнить характеристики и зоны действия существующих защит от ОЗЗ, основанных на использовании способа двустороннего замера напряжения указанной гармоники.

Литература

1. Safari-Shad N., Franklin R. Adaptive 100% Stator Ground Fault Protection Based on Third-Harmonic Differential Voltage Scheme // IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. 31(4):1-1.
2. Fulczyk M., Mydlkowski R. Influence of Generator Load Conditions on 3rd-harmonic Voltages in Generator Stator Winding // IEEE Trans. on Energy Conversion. 2005. Vol. 20. No 1.
3. Алешин К.С., Семушкин А.А., Шуин В.А. Имитационная модель для исследования третьей гармоники в ЭДС синхронного генератора // Вестник ИГЭУ, 2025, Вып. 2, стр. 18–27.
4. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. М.: Энергия, 1976. 560 с.
5. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций / А.А. Атюшин, А.Е. Гомберг, В.П. Караваев и др.; под ред. Э.С. Мусаэляна. М.: Энергоатомиздат, 1989. 34 с.
6. Турбогенераторы / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная и др. Л.: «Энергия», 1967. 895 с.
7. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова и Б. К. Клокова. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.
8. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: «Энергия», 1974. – 840 с.
9. Гидрогенераторы / И.А. Глебов, В.В. Домбровский, А.А. Дикштау и др. Л.: Энергоиздат, 1982. 368 с.

УДК 621.316.925

В.Ф. ЛАЧУГИН, д.т.н.,
М.Е. МАРТЫНОВ¹, аспирант,
И.О. САВЕЛЬЕВ, аспирант

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1
E-mail: MartynovMikY@mpei.ru1

Актуальные проблемы релейной защиты в городских и сельских распределительных сетях

Аннотация. Рассматриваются актуальные проблемы, возникающие при проектировании и эксплуатации релейной защиты в городских и сельских распределительных сетях напряжением 6-35 кВ. Описываются основные технические сложности, связанные с особенностями работы различных типов реле, конфигурациями сетей и условиями эксплуатации. Особое внимание уделяется вопросам координации защит, надежности функционирования оборудования и внедрению современных технологий для повышения эффективности системы защиты.

Ключевые слова: релейная защита, городские распределительные сети, сельские распределительные сети.

V.F. LACHUGIN, Doctor of Engineering,
M.E. MARTYNOV, graduate student,
I.O. SAVELYEV, graduate student

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14, building 1
E-mail: MartynovMikY@mpei.ru1

Current problems of relay protection in urban and rural distribution networks

Abstract. The current problems arising in the design and operation of relay protection in urban and rural distribution networks with a voltage of 6-35 kV are considered. The main technical difficulties associated with the operation of various types of relays, network configurations and specific operating conditions are described. Special attention is paid to the issues of protection coordination, reliability of equipment functioning and the introduction of modern technologies to improve the effectiveness of the protection system.

Key words: relay protection, urban distribution networks, rural distribution networks

Релейная защита является одной из ключевых составляющих электроэнергетики, обеспечивающей надежную работу энергосистем и предотвращение развития аварийных ситуаций. С усложнением структуры распределительных сетей, увеличением ее нагрузки и изменением условий эксплуатации возникают новые проблемы, требующие тщательного анализа и поиска эффективных решений. Настоящая

статья посвящена рассмотрению актуальных проблем релейной защиты в городских и сельских распределительных сетях, выявлению основных факторов, влияющих на надежность и эффективность защитных устройств, а также обсуждению возможных путей решения этих проблем.

Для обеспечения надежной работы электрических сетей используются различные виды релейной защиты, такие как максимальная токовая защита (МТЗ), дифференциальная защита, дистанционная защита и защита от замыканий на землю. Стоит рассмотреть основные типы релейной защиты более подробно, так как каждый тип защиты имеет свои особенности и применяется в зависимости от конкретных условий сети и требований к безопасности.

Наиболее простой защитой является МТЗ[1], используемая в распределительных сетях 6-20 кВ в качестве основной при определении перегрузок и коротких замыканий на линиях электропередачи, а также - в качестве резервной при возможном использовании в качестве основных более сложных защит. Основным недостатком МТЗ является необходимость точной настройки ее порогов срабатывания, особенно при наличии большого числа двигательной нагрузки.

Дифференциальная токовая защита применяется для защиты трансформаторов, генераторов и других элементов сети. Принцип ее работы основан на сравнении токов по краям защищаемой зоны. Если разница между этими токами превышает установленное значение, то защита срабатывает. Основной проблемой дифференциальной защиты является её чувствительность к ошибкам измерения и внешним воздействиям.

Дистанционная защита предназначена для определения повреждения в линии электропередачи путем измерения сопротивления до точки короткого замыкания. Она позволяет селективно отключать поврежденные участки сети, в том числе осуществляя функции дальнего резервирования. Данная защита используется на линиях напряжением 35 кВ и выше. Однако сложность настройки и возможные ошибки измерений являются основными проблемами дистанционного метода.

Защита от замыканий на землю используется для предотвращения повреждений оборудования электрических сетей и снижения риска поражения электрическим током при однофазных замыканиях на землю. Основными трудностями являются обеспечение требуемой чувствительности в различных режимах заземления нейтрали и при изменении конфигурации сети [2], а также при замыканиях через большие переходные сопротивления.

Городские электрические сети характеризуются высокой плотностью нагрузки, сложной топологией и частым изменением режимов работы. Это создает ряд специфических проблем при согласовании действий различных устройств защиты [3]. Появляется необходимость в обеспечении селективности отключения для минимизации последствия ава-

рийных ситуаций, а также учета того, что городские сети часто работают вблизи предельных значений пропускной способности, приводящих к увеличению риска перегрузки и ложных срабатываний защит.

В последние годы всё чаще наблюдаются резкие изменения конфигурации сети. Постоянные строительные работы и модернизация инфраструктуры приводят к изменениям в схеме подключения потребителей, что требует регулярной корректировки параметров срабатывания защит.

Сельские электрические сети отличаются от городских сетей низкой плотностью нагрузки, большими расстояниями между потребителями. Следует отметить проблемы, связанные с:

- ограниченностью ресурсов вследствие недостаточных объемов финансирования и нехватки квалифицированного персонала, затрудняющие возможности качественного обслуживания защитного оборудования;
- сложностью оперативного получения точных данных о состоянии сети при реагировании на неисправности из-за низкой оснащенности системами передачи информации;
- влиянием погодных условий, таких как грозы, сильные ветра и морозы, значительно повышающие вероятность отказов и усложняющие эксплуатацию оборудования.

Для улучшения надежности и эффективности релейной защиты предлагаются следующие возможные пути решения указанных проблем:

- использование интеллектуальных технологий, позволяющих улучшить мониторинг состояния сети и повысить точность настройки параметров защиты [4];
- реализация адаптивных алгоритмов, например, на основе нейронных сетей для автоматической корректировки параметров срабатывания защиты при изменяющихся условиях работы сети, в том числе при активном внедрении возобновляемых источников энергии и систем аккумулирования энергии;
- систематическое повышение квалификации персонала с целью повышения качества обслуживания современного оборудования;
- модернизация инфраструктуры, связанная с заменой устаревшего оборудования новыми устройствами с улучшенными характеристиками и функциями самодиагностики.

Заключение. Проблемы релейной защиты в городских и сельских распределительных сетях остаются актуальными и требуют комплексного подхода к их решению. Совершенствование технологий, автоматизация процессов и повышение квалификации персонала позволят существенно улучшить надежность и безопасность работы энергетических систем. Важно продолжать исследования и разработки в этой области, чтобы соответствовать современным требованиям и обеспечивать стабильное электроснабжение потребителей нагрузки.

Литература

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов- М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. Лачугин В.Ф. Устройства защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ ОАО "МРСК Юга" и необходимость разработки требований по учету работы этих защит / В.Ф. Лачугин, В.Ф. Кононенко. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 86-87.
3. Соловьев А.Л., Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ: Учебное пособие / А.Л. Соловьев, М.А. Шабад; под. ред. А.В. Беляева. СПб.: Политехника, 2007.
4. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007.

УДК 621.316.925.1

И.А. НАЗАРЕНКО, студент,
Д.М. КОРОБОВ, студент,
С.А. РОМАНОВ, студент

Дзержинский политехнический институт (филиал)
Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева
606026, Нижегородская область, г. Дзержинск, ул. Гайдара, 49
E-mail: Ilia1401@bk.ru

Повышение чувствительности максимальной токовой защиты протяженных линий электропередачи 6-35 кВ с использованием автоматических секционирующих аппаратов

Аннотация. Рассмотрена проблема повышения чувствительности максимальной токовой защиты протяженных линий электропередачи 6-35 кВ с использованием автоматических секционирующих аппаратов.

Ключевые слова. Максимальная токовая защита, распределительные сети, чувствительность, секционирующий пункт.

I.A. NAZARENKO, student,
D.M. KOROBOV, student,
S.A. ROMASHOV, student

Dzerzhinsk Polytechnic Institute (Branch)
R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University
606026, Nizhny Novgorod Region, Dzerzhinsk, Gaidara Street, 49
E-mail: Ilia1401@bk.ru

Increasing the Sensitivity of Overcurrent Protection for Extended 6-35 kV Power Transmission Lines Using Automatic Sectioning Devices

Abstract. The paper addresses the problem of increasing the sensitivity of overcurrent protection for extended 6-35 kV power transmission lines using automatic sectioning devices.

Key words. Overcurrent protection, distribution networks, sensitivity, sectionalizing point.

В протяженных линиях электропередачи (ЛЭП) напряжением 6-20 кВ (как воздушных, так и кабельных) длиной более 10-15 км возникает проблема обеспечения чувствительности токовых защит к коротким замыканиям (КЗ) в конце линии. Причинами этого являются: удаленность точки КЗ от источника питания, необходимость отстройки от токов самозапуска нагрузок, подключенных по всей длине ЛЭП, низкая электрическая плотность нагрузок. Дополнительные сложности при обеспечении чувствительности возникают, когда в зоне защиты есть трансформатор 6-20/0,4кВ, тогда токовая защита, установленная на головном выключателе ЛЭП, должна обеспечивать надежное отключение коротких замыканий на низкой стороне трансформатора.

Проведенные исследования показывают, что при длинах линий более 20 км и распределении нагрузок вдоль всей длины ЛЭП максимальная токовая защита (МТЗ) не обеспечивает требование ПУЭ в основной зоне защиты. Одним из вариантов решения обозначенных проблем является применение автоматических секционирующих аппаратов (например, реклоузеров) для сокращения зоны защиты МТЗ головного участка и установки дополнительного комплекта МТЗ на секционирующем пункте, обеспечивающем надежное отключение КЗ в конце ЛЭП.

Рассмотрим протяженную распределительную сеть 6-35 кВ на примере участка сети 6 кВ системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей одного из районов Нижегородской области, представленной на рис. 1.

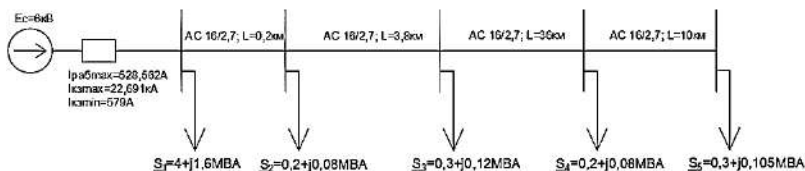


Рис. 1. Участок системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей

Рассчитываем ток срабатывания МТЗ для РТ-40 с коэффициентом самозапуска для обобщенной нагрузки ($k_n = 1,2$, $k_B = 0,85$, $k_{\text{зап}}=2,86$):

$$I_{\text{с.з.}} \geq \frac{k_n \cdot k_{\text{зап}}}{k_B} \cdot I_{\text{рабmax}} = \frac{1,2 \cdot 2,86}{0,85} \cdot 528,562 = 2134,48 \text{ А} \quad (1)$$

Коэффициент чувствительности по концу ЛЭП:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к1.min}}^{(2)}}{I_{\text{с.з.}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к.min}}}{I_{\text{с.з.}}} = 0,865 \cdot \frac{579}{2134,48} = 0,235 < 1,5 \quad (2)$$

По результатам моделирования КЗ в различных точках по длине ЛЭП определяем предельный участок, для которого обеспечивается необходимая чувствительность ($k_{\text{ч}}=1,5$):

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к1.min}}^{(2)}}{I_{\text{с.з.}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к.min}}}{I_{\text{с.з.}}} = 0,865 \cdot \frac{3794,335}{2134,48} = 1,539 \quad (3)$$

Защита не удовлетворяет условию чувствительности не только в конце линии, но и за точкой подключения нагрузки $\underline{S}_2$ на расстоянии более 0,9 км.

Теперь рассмотрим пример внедрения секционирующих пунктов на рис. 2.

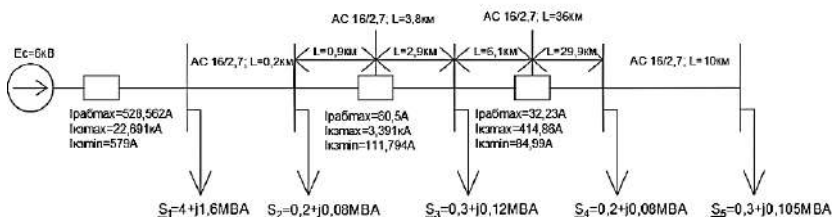


Рис. 2. Участок системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей с секционирующими пунктами

Основная защита чувствительна только до участка на расстоянии 1,1 км от первой нагрузки $\underline{S}_1$, так как она в 4 раза превышает установленную мощность нагрузки остальных потребителей, получающих питание от рассматриваемой ЛЭП, и завывает токовую уставку МТЗ, поэтому придётся поставить секционирующий пункт после точки подключения нагрузки $\underline{S}_2$ на расстоянии 0,9 км.

Рассчитываем ток срабатывания МТЗ для РТ-40 с коэффициентом самозапуска для обобщенной нагрузки ($k_{\text{н}} = 1,2$, $k_{\text{в}} = 0,85$, $k_{\text{сзан}}=2,86$):

$$I_{\text{с.з.}} \geq \frac{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{сзан}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{рабmax}} = \frac{1,2 \cdot 2,86}{0,85} \cdot 60,5 = 244,277 \text{ А} \quad (4)$$

Коэффициент чувствительности по концу ЛЭП:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к1.min}}^{(2)}}{I_{\text{с.з.}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к.min}}}{I_{\text{с.з.}}} = 0,866 \cdot \frac{111,794}{244,277} = 0,396 < 1,5 \quad (5)$$

По результатам моделирования КЗ в различных точках по длине ЛЭП определяем предельный участок, для которого обеспечивается необходимая чувствительность ($k_{\text{ч}}=1,5$):

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к1.min}}^{(2)}}{I_{\text{с.з.}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к.min}}}{I_{\text{с.з.}}} = 0,866 \cdot \frac{432,184}{244,277} = 1,532 \quad (6)$$

Этот секционирующий пункт обеспечивает требуемую чувствительность до участка на расстоянии 6,1 км после нагрузки $\underline{S}_3$, на котором устанавливается ещё один секционирующий пункт.

Рассчитываем ток срабатывания МТЗ для РТ-40 с коэффициентом самозапуска для обобщенной нагрузки ($k_n = 1,2$, $k_B = 0,85$, $k_{\text{сзап}} = 2,86$):

$$I_{\text{с.з.}} \geq \frac{k_n \cdot k_{\text{сзап}}}{k_B} \cdot I_{\text{рабmax}} = \frac{1,2 \cdot 2,86}{0,85} \cdot 32,23 = 130,133 \text{ А} \quad (7)$$

Коэффициент чувствительности по концу ЛЭП:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к1.min}}^{(2)}}{I_{\text{с.з.}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к.min}}}{I_{\text{с.з.}}} = 0,866 \cdot \frac{84,99}{130,133} = 0,566 < 1,5 \quad (8)$$

По результатам моделирования КЗ в различных точках по длине ЛЭП определяем предельный участок, для которого обеспечивается необходимая чувствительность ($k_{\text{ч}} = 1,5$):

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к1.min}}^{(2)}}{I_{\text{с.з.}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к.min}}}{I_{\text{с.з.}}} = 0,866 \cdot \frac{232,143}{130,133} = 1,545 \quad (9)$$

Этот пункт секционирования, в свою очередь, позволяет защитить только небольшой участок линии длиной 8 км после его установки. Дальнейшее добавление секционирующих аппаратов не будет приводить к сокращению незащищённого участка. Тем самым, к КЗ на оставшихся нагрузках $\underline{S}_4$, $\underline{S}_5$ и ЛЭП протяжённостью 31,9 км защита чувствительна не будет.

Вывод. В данном примере решение по применению автоматических секционирующих пунктов за счёт разбиения зоны защиты линии на несколько независимых участков позволяет повысить чувствительность МТЗ с 2,2% до 36,2% длины ЛЭП.

Литература

1. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
2. СНиП 2.05.06-85* «Электрические сети».
3. Шабад М.А. Расчет релейной защиты и автоматики распределительных сетей. 4-е изд. 2010.
4. СТО 56947007- 29.120.70.305-2020.

УДК 621.316.925.1

Л.Р. РОМАНОВ¹, аспирант
М. В. ШАРЫГИН¹ д.т.н.,
О.В. КРЮКОВ² д.т.н

НГТУ имени Р. Е. Алексеева¹,
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
ООО «ТСН-электро»²,
603108, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, д. 7А
E-mail: RomanovL.R@yandex.ru

Применение объектных характеристик для построения многопараметрической токовой защиты

Аннотация. Предложен способ улучшения эффективности работы токовых защит враспределительных сетях 6–35кВ за счет применения многопараметрической защиты по параметрам аварийного режима. Рассмотрен способ оценки эффективности (чувствительности) различных защит посредством объектных характеристик.

Ключевые слова: электроснабжение, многопараметрическая токовая защита, объектная характеристика, имитационное моделирование, PSCAD.

L.R.ROMANOV¹,graduate student
M. V. SHARYGIN¹,Doctor of Tech. Sciences
O.V. KRYUKOV², Doctor of Tech. Sciences

NSTU n.a. R.E. Alekseev¹
603155, Nizhny Novgorod, Ulitsa Minina 24
TCN-electro LLC²
603108, Nizhny Novgorod, Ulitsa Elektrovznaya 7A
E-mail: RomanovL.R@yandex.ru

Application of object characteristics for designing multiparametric overcurrent protection

Abstract. A method is proposed to enhance the efficiency of overcurrent protection systems in 6-35 kV distribution networks by implementing multiparametric protection based on fault condition parameters. The study examines a technique for evaluating the effectiveness (sensitivity) of various protection systems using object characteristics.

Key words: power supply, multiparametric overcurrent protection, object characteristics, simulation modeling, PSCAD.

Широкое применение цифровых микропроцессорных терминалов РЗА в электрических сетях позволяет применять новые подходы к организации алгоритмов их работы. Например, если рассмотреть электрические распределительные сети 6–35 кВ, то в них наиболее распространенным видом защит являются токовые. Однако такие защиты несмотря на низкую стоимость, простоту и надежность имеют ряд недостатков:низкая чувствительность относительно других более совершенных и дорогостоящих защит (дистанционных и дифференциаль-

ных), резкое снижение чувствительности при переходном сопротивлении в точке КЗ [1, 2].

Перспективным решением вышеуказанных недостатков является применение многопараметрических токовых защит. Их преимуществом является возможность использования N -го количества параметров электрической сети, которая позволяет подобрать наиболее информационно значимые параметры [3], тем самым достигая наибольшей эффективности. Примером таких защит являются [2, 3, 4], показавшие улучшение эффективности относительно традиционной токовой защиты.

Однако анализ эффективности многопараметрических защит осложнен невозможностью применения стандартного коэффициента чувствительности, как для традиционных видов защит. Тем не менее существует несколько способов сравнения традиционных и многопараметрических защит: интегральный критерий оценки по количеству информации (энтропии), объектные характеристики и т.п. [2,3].

Наглядным методом оценки чувствительности РЗА служит построение объектных характеристик, являющихся зависимостью между значением переходного сопротивления и расстоянием до места повреждения на линии, при котором РЗА сохраняет возможность идентификации КЗ [5, 6]. Произведем анализ эффективности двух защит (классическая токовая и многопараметрическая) при помощи указанного способа. В качестве улучшенной защиты будет выступать двухпараметрическая токовая защита по параметрам аварийного режима ($I_{ав}$, $\varphi_{ав}$), подробно рассмотренная в статьях [2, 4]. Принципиальная схема имитационной модели электрической сети 10 кВ с односторонним питанием представлена на рис. 1.

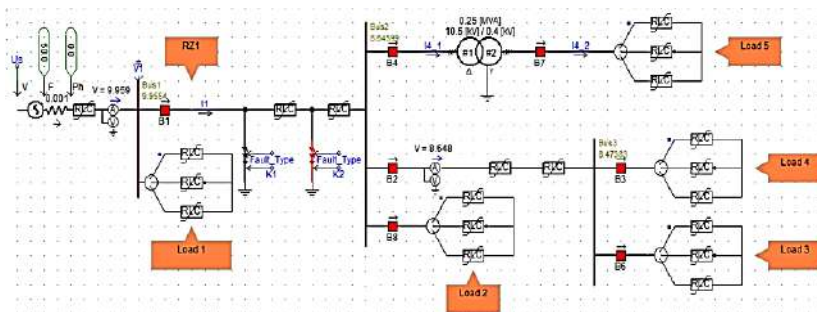


Рис. 1. Принципиальная схема имитационной модели участка сети 10 кВ

Статистическое моделирование производилось по методу Монте-Карло, при каждой новой итерации изменялись сопротивление и напряжение питающей системы, мощность нагрузки, место и вид КЗ (двухфазные и трехфазные).

По полученным в ходе моделирования статистическим данным о коротких замыканиях вдоль линии ВЛ1 были построены объектные характеристики для классической токовой (рис.2) и двухпараметрической токовой (рис. 3) защиты.

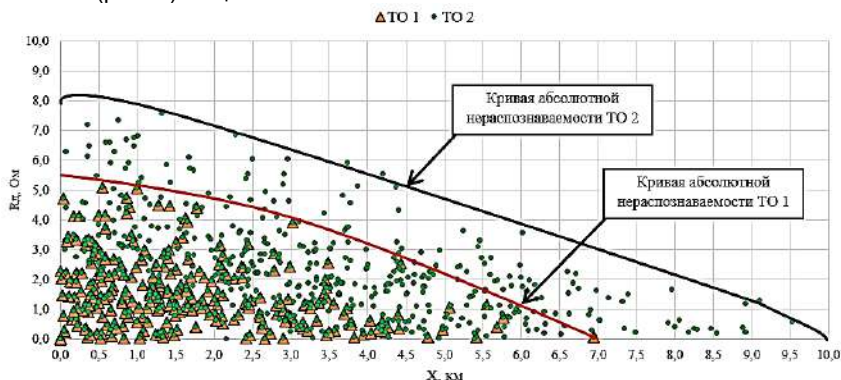


Рис. 2. Объектная характеристика для первой и второй ступени классической токовой защиты

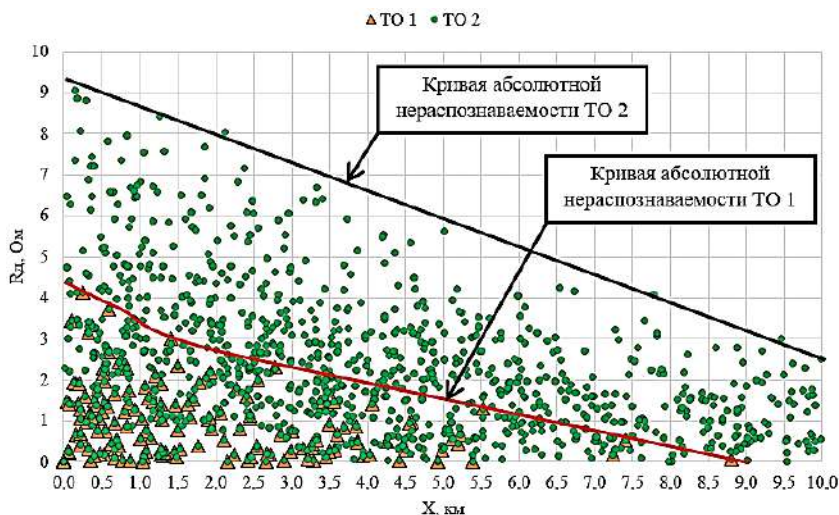


Рис. 3. Объектная характеристика для первой и второй ступени двухпараметрической токовой защиты

Объектные характеристики на рис. 2 и 3 позволяют определить граничные значения переходного сопротивления R_d в месте замыкания и

удаленность от места установки защиты, при котором измерительные органы РЗ смогут его распознать. Для дальнейшего сравнения защит проведем кривую абсолютной нераспознаваемости для каждой ступени защиты по граничным значениям. Таким образом видно, что двухпараметрическая защита $I_{ав}, \varphi_{ав}$ распознает КЗ при больших значениях R_d и на большем удалении, чем традиционная защита.

Выводы. Рассмотрены способы оценки эффективности многопараметрических защит. Построены объектные характеристики с кривыми абсолютного нераспознавания для двух токовых защит (классической и двухпараметрической), исходя из результатов которых подтверждено преимущество многопараметрических защит перед классическими.

Также из результатов можно сделать дополнительный вывод, что предлагаемая двухпараметрическая защита по $I_{ав}, \varphi_{ав}$, отлично подходит для организации дальнего резервирования, так как она способна распознать аварийный режим за пределами защищаемой линии ступенью ТО2 с малой выдержкой времени срабатывания.

Литература

1. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007, 548 с
2. Шарыгин М. В., Романов Л.Р. Многофункциональная цифровая токовая защита распределительных электрических сетей 6-35 кВ // Электричество. 2024. № 12. С. 58-66.
3. Шарыгин М.В., Куликов А.Л. Защита и автоматика систем электроснабжения с активными промышленными потребителями: монография. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2017, 284 с.
4. Шарыгин М. В., Романов Л.Р., Крюков О.В. Совершенствование токовых защит реклоузеров в распределительных сетях 6-35 кВ // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): Материалы МНТК. Т. 3. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2023. С. 336-339.
5. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Нудельман Г.С. Метод объектных характеристик для анализа и синтеза дистанционной защиты. Изв. вуз. Электромеханика, 1999, №1, с. 95.
6. Лоскутов А.А., Пелевин П.С., Митрович М. Разработка логической части интеллектуальной многопараметрической релейной защиты // Электричество. 2020. №5. С. 12-18.

УДК 621.316.925.1

С.А. РОМАШОВ, студент
Д.М. КОРОБОВ, студент
И.А. НАЗАРЕНКО, студент

Дзержинский политехнический институт (филиал)
Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева
606026, Нижегородская область, г. Дзержинск, ул. Гайдара, 49
E-mail: sergeyromashov3@gmail.com

Повышение надежности длинных присоединений распределительных сетей 6-35 кВ

Аннотация. Рассмотрена проблема обеспечения чувствительности релейной защиты длинных присоединений распределительных сетей 6-35 кВ сельскохозяйственного назначения.

Ключевые слова. Релейная защита, распределительные сети, электроснабжение.

S.A. ROMASHOV, student
D.M. KOROBV, student
I.A. NAZARENKO, student

Dzerzhinsk Polytechnic Institute (Branch)
R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University
606026, Nizhny Novgorod Region, Dzerzhinsk, Gaidara Street, 49
E-mail: sergeyromashov3@gmail.com

Improving the reliability of long connections of 6-35 kV distribution networks

Annotation. The problem of ensuring the sensitivity of relay protection of long connections of 6-35 kV agricultural distribution networks is considered.

Key words. Relay protection, distribution networks, and power supply.

Распределительные электрические сети 6-35 кВ играют важную роль в обеспечении надежного электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей. Однако в условиях удаленных объектов и больших расстояний между трансформаторными подстанциями 6-10/0,4 кВвозникают проблемы обеспечения требуемого качества электроэнергии в точках подключения конечных электроприёмников. Причинами этого являются значительные потери напряжения в линиях, рост потерь мощности, низкая плотность электрических нагрузок. Указанные обстоятельства снижают чувствительность релейной защиты и затрудняют выполнение требований ПУЭ.

В данной работе рассматриваются проблема обеспечения чувствительности релейной защиты протяженных распределительных сетей 6-35 кВ на примере участка сети 6 кВ системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей одного из районов Нижегородской области, представленной на рис. 1.

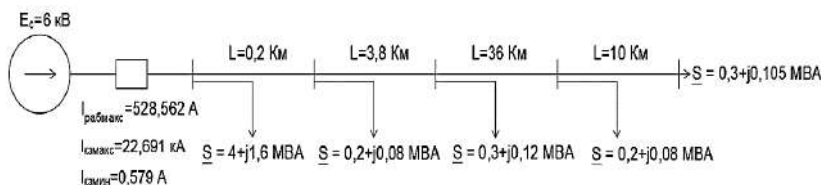


Рис. 1. Участок системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей

Произведем расчет уставок релейной защиты, установленной в начале воздушной линии электропередачи, выполненной на основе микропроцессорного терминала РТ.9.10 НППАЛИМП.

Рассчитываем ток срабатывания МТЗс коэффициентом самозапуска для обобщенной нагрузки ($k_n = 1,1; k_B = 0,9; k_{сзап} = 2,5$):

$$I_{с.з.} \geq \frac{k_n \cdot k_{сзап}}{k_B} \cdot I_{рабmax} = \frac{1,1 \cdot 2,5}{0,9} \cdot 528,562 = 1530,049 \text{ А} \quad (1)$$

Коэффициент чувствительности:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к1.min}}^{(2)}}{I_{с.з.}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к.min}}}{I_{с.з.}} = 0,865 \cdot \frac{579}{1530,049} = 0,378 < 1,5 \quad (2)$$

Защита не удовлетворяет условию чувствительности в конце линии.

Рассчитываем ток срабатывания МТЗ с коэффициентом самозапуска для бытовой нагрузки ($k_n = 1,1; k_B = 0,9; k_{сзап} = 1,3$):

$$I_{с.з.} \geq \frac{k_n \cdot k_{сзап}}{k_B} \cdot I_{рабmax} = \frac{1,1 \cdot 1,3}{0,9} \cdot 528,562 = 839,826 \text{ А} \quad (3)$$

Коэффициент чувствительности:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к1.min}}^{(2)}}{I_{с.з.}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к.min}}}{I_{с.з.}} = 0,865 \cdot \frac{579}{839,826} = 0,597 < 1,5 \quad (4)$$

В обоих случаях чувствительность релейной защиты не удовлетворяет условию при длине линии более 0,2 км.

Рассмотрим применение дистанционной защиты.

Дистанционными называют направленные защиты с относительной селективностью, выполняемые с использованием реле минимального сопротивления.

Основным органом дистанционной защиты является измерительный дистанционный орган, определяющий удалённость КЗ. В качестве дистанционного органа используются реле сопротивления (РС), для которого отношение остаточного напряжения на шинах ($U_{\text{ш}}$), где установлена защита к току КЗ ($I_{\text{к}}$) пропорционально расстоянию от места КЗ до места установки защиты:

$$\frac{U_{\text{ш}}}{I_{\text{к}}} = Z_{\text{уд}} \cdot l \quad (5)$$

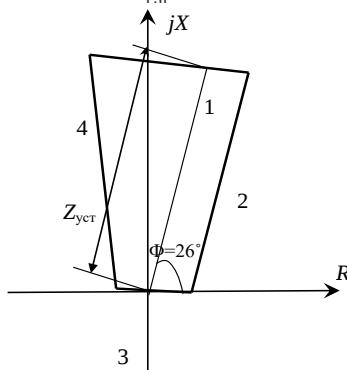
Сопротивление всей линии длиной 50 км: $Z_{л} = 43,087 \text{ Ом}$.

Первая ступень должна охватывать 80-85% длины всей линии:

$$Z_{с.з.}^I = 36,623 \text{ Ом} \quad (6)$$

Сопротивление срабатывания второй ступени отстраивается от первой:

$$Z_{с.з.1}^{II} \leq 0,85Z_{л1} + \frac{0,78}{K_{T.II}} Z_{с.з.3}^I = 65,277 \text{ Ом} \quad (7)$$



Моделирование двух и трехфазных коротких замыканий по длине линии показывает, что применение дистанционной защиты позволяет увеличить чувствительность и увеличить зону защиты по сравнению с МТЗ на 20%. При этом проблема обеспечения чувствительности защиты к минимальным токам короткого замыкания в конце линии не решается. В протяженных линиях электропередачи с несколькими точками подключения нагрузки, в том числе при наличии источников распределенной генерации, перспективным видом релейной защиты от всех видов КЗ может рассматриваться дифференциальная защита линии.

Вывод. Простейшие токовые защиты не способны обеспечивать требуемую чувствительность подобных присоединений. Дистанционная защита является методом повышения чувствительности релейной защиты, по полностью требуемый уровень чувствительности она обеспечить не может.

Литература

1. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
2. СНиП 2.05.06-85* «Электрические сети».
3. Шабад М.А. Расчет релейной защиты и автоматики распределительных сетей. 4-е изд. 2010.
4. СТО 56947007- 29.120.70.305-2020.

АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

А

АББЯСОВ А.М.	95
АЛЁШИН К.С.	266, 280
АНИСИМОВ А.А.	92
АПОЛОНСКИЙ В.В.	98

Б

БАКЛАНОВ В.Д.	164, 167
БЕДЕКЕР А.А.	131
БЛУВШТЕЙН Д.В.	42
БОБРОВ С.Е.	213

В

ВАЙТЕЛЕНКО Л.В.	234
ВАЛЕЕВ Э.А.	146
ВАСЕНИН А.Б.	49
ВЕДЕРНИКОВА И.И.	201
ВЕНЦЕРЕВ М.С.	174
ВИЛКОВ П.В.	66
ВИНОГРАДОВ А.Б.	52, 56
ВИХАРЕВ Д.Ю.	205, 217, 223
ВЛАСОВ А.М.	197
ВОЛКОВА М.Ю.	190

Г

ГАЙФУЛЛИН Н.Г.	34
ГАЛАНИН И.А.	272
ГАЛОЧКИН А.Н.	170
ГЕРАСИМОВ А.С.	52
ГОРЕЛКИН Р.О.	52
ГРИГОРЬЕВ Д.Г.	228, 231
ГРИГОРЬЕВ О.Ю.	102
ГУЛЯЕВ И.В.	46

Д

ДЕНИСОВ Е.С.	34
ДЕРГАЧЕВ П.А.	174
ДМИТРИЕВСКИЙ В.А.	146

Е

ЕВДАКОВ А.Е.	238
ЕГОРОВ В.Н.	88
ЕЛИЗАРОВА Н.Н.	12
ЕРМАКОВ К.К.	56

Ж

ЖУКОВ А.А.	197
------------	-----

З

ЗАЙЦЕВ Д.С.	76
ЗАХАРОВ А.В.	131

ЗАХАРОВ М.А.	73
ЗИМИЧЕВА А.А.	275
ЗОНИН Л.М.	6
ЗУБКОВ Ю.В.	170

И

ИВЛИЧЕВ Е.П.	38
ИЛЫИНА Е.Э.	177
ИСАЕВА М.В.	127

К

КАЗАКБАЕВ В.М.	146
КАЗАКОВ Ю.Б.	143, 155
КАПРИЛЬЯНЦ А.А.	193
КАРАУЛОВ В.Н.	158
КОБЕЛЕВ А.С.	136
КОВЖЕНКИН В.С.	234
КОЖЕВНИКОВ С.О.	102, 104
КОЖЕВНИКОВА Л.В.	102, 104
КОЛГАНОВ А.Р.	59
КОЛОБОВ А.Б.	180
КОЛПАКОВ К.А.	104
КОПЫЛОВА Л.Г.	110
КОРОБОВ Д.М.	289, 297
КОРОТКОВ А.А.	56
КОСЯКОВ С.В.	31
КРЮКОВ О.В.	46, 49, 293
КУЗЬМИНА Н.В.	266
КУЛЕНКО М.С.	59
КУЛЕШОВ А.И.	244
КУЛИКОВА И.А.	244
КУРЛАКОВ Е.А.	158
КУТУМОВ Ю.Д.	244, 248, 251
	263

Л

ЛАЧУГИН В.Ф.	286
ЛЕБЕДЕВ В.Д.	255
ЛЕБЕДЕВ С.К.	59
ЛЮДИН К.В.	9
ЛЯПИН С.А.	25

М

МАЛЬЦЕВ Д.Д.	263
МАРТЫНОВ М.Е.	286
МАСЛОВ Л.Б.	177
МИРОНОВА А.А.	167, 164
МИХАЙЛИШИНА А.А.	183
МУРЗИН А.Ю.	205, 217, 223

Н

НАЗАРЕНКО И.А.	289, 297
НАУМОВ К.И.	251
НЕПЕИН М.Д.	174
НЕСТЕРОВ С.А.	164, 167
НЕЧАЕВ В.А.	31
НОВИКОВ И.В.	155
НОВОСЕЛОВ Е.М.	73
НОЗДРИН М.А.	183, 186

О

ОГУРЦОВ Ф.Б.	180
--------------	-----

П

ПАВЛЮКОВА Н.Л.	190, 193
ПАНАЩАТЕНКО А.В.	213
ПАНТЕЛЕЕВ Е.Р.	9
ПАРАМОНОВ А.С.	146
ПЕКУНОВ В.В.	3
ПЕТРОВ А.Е.	255
ПЕТРОВСКИЙ С.В.	15
ПОДШИВАЛОВ Е.С.	46
ПОЛКОШНИКОВ Д.А.	73
ПРАХТ В.А.	146
ПРОХОРОВА Н.В.	121

Р

РАТМАНОВА И.Д.	6
РОДИН Н.А.	205, 217, 223
РОЗИН В.Е.	115
РОМАНОВ Л.Р.	293
РОМАШОВ С.А.	289, 297
САВЕЛЬЕВ И.О.	286
СЕМУШКИН А.А.	266, 280
СИДОРОВ С.Г.	25, 38
СИНОДЕЕВА П.И.	201
СКОРОБОГАТОВ А.А.	73
СОБОЛЕВ В.А.	79, 83
СОКОЛОВ К.Е.	92
СОКОЛОВА А.С.	12
СОЛОВЬЕВ В.А.	79, 83
СОЛОВЬЕВ Е.Р.	125
СОЛОВЬЕВА В.В.	79, 83
СОЛОМАНИЧЕВ М.А.	69

СОЛОПОВ Р.В.	234
СОРОКОВНИН М.	107
СТЕПАНОВ С.Е.	49
СТЕПАШКИН Д.Е.	63
СТРАХОВ А.С.	73
СТУЛОВ А.В.	121, 115

Т

ТАРАРЫКИН С.В.	95, 98
ТИХОМИРОВ А.Р.	186
ТИХОНОВ А.И.	115, 118, 121, 125, 127
ТИХОНОВ Д.А.	121

Ф

ФАДЕЕВА М.С.	118
ФИЛАТОВА Г.А.	238, 258
ФИЛИППОВ В.А.	161
ФОМИЧЁВ А.А.	261

Х

ХУДЯКОВ М.Д.	66
--------------	----

Ц

ЦВЕТКОВ М.И.	248
--------------	-----

Ч

ЧЕРНЫШЕВА Л.П.	
----------------	--

Ш

ШАДРИКОВА Т.Ю.	266
ШАРАБАНОВ Н.А.	20
ШАРЫГИН Д.С.	258
ШАРЫГИН М.В.	293
ШИРЯЕВ А.Н.	63
ШИРЯЕВА П.В.	251
ШИШКИН В.П.	140
ШОРОНОВ В.Е.	161
ШУИН В.А.	266, 275, 280

Я

ЯБЛОКОВ А.А.	213, 258
--------------	----------

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ	3
Секция 7. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И УСТАНОВКАМИ	46
Секция 8. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ	88
Секция 10. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА	115
Секция 11. ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	177
Секция 13. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ	190
Секция 19. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	205

МАТЕРИАЛЫ
Международной научно-технической конференции
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»**
(XXIII Бенардосовские чтения),

*посвящается 80-летию
Российской атомной промышленности*

Печатаются в авторской редакции

III том
Электротехника

Электронное издание

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