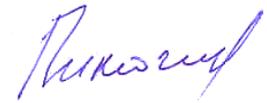


На правах рукописи



ПИЛЮГИН Геннадий Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ
СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Красноярск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Пантелеев Василий Иванович

Официальные оппоненты:

Харламов Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электрические машины и общая электротехника», заведующий кафедрой;

Плотников Сергей Михайлович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», кафедра «Автоматизации производственных процессов», профессор.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Защита состоится «15» мая 2024 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.12, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, ул. Киренского, 26, корпус №14, ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

 Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы заключается в необходимости обоснования использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий. Эффективность работы промышленных предприятий определяется во многом экономичностью функционирования систем электроснабжения, которая важна при существенных удельных расходах электроэнергии и высокой энергетической составляющей в структуре себестоимости продукции. Значимой характеристикой расхода электроэнергии являются потери активной мощности в системе электроснабжения. Резервом повышения эффективности работы систем электроснабжения промышленных предприятий является более обоснованный учёт фактических значений потерь активной мощности в элементах, который необходим для достоверности балансовых расчётов электроэнергии и для выбора мероприятий и рекомендаций по снижению потерь активной мощности.

Отличительной особенностью ряда промышленных предприятий, а именно, обогатительных фабрик и заводов цветной металлургии, является значительная доля установленной мощности высоковольтных синхронных двигателей (ВСД), которая составляет от 30 до 60 %. ВСД на промышленных предприятиях могут быть использованы как источники реактивной мощности, и при этом, может быть достигнута полная компенсация реактивной мощности на шинах главных понизительных подстанций.

Согласно концепции интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью, ВСД – это активный элемент, под которым подразумевается управляемое устройство компенсации реактивной мощности, применимое для минимизации потерь активной мощности в системе электроснабжения. Из этого можно заключить, что ВСД следует рассматривать не только как электроприемник, но и как элемент, участвующий в управлении функционированием системы электроснабжения, при этом следует учитывать потери активной мощности двигателя в общей структуре потерь активной мощности системы электроснабжения.

Обеспечить управление режимом реактивной мощности ВСД можно за счет изменения управляющих воздействий, а именно, тока возбуждения и напряжения питания обмоток статора. Такие управляющие воздействия изменяют состояния ВСД, вследствие чего будет изменяться как реактивная, так и активная мощности, потребляемые из сети, и потери активной мощности, что предопределяет необходимость в непрерывной оценке его состояния при изменении управляющих воздействий.

Определению потерь активной мощности в ВСД при различных управляющих воздействиях, посвящены работы Л.В. Литвака, И.А. Сыромятникова, И.А. Никулина, В.А. Трошина, Ю.М. Тюханова, М.В. Грейсуха, П.П. Вершинина, Б.А. Константинова, Э.Г. Куренного, В.В. Архипенко, В.И. Пантелеева, А.Н. Филатова и других ученых. Результаты их исследований можно разделить на полученные с использованием теоретических математических моделей (теоретический подход) и экспериментальных математических моделей (экспериментальный подход).

На основе анализа работ, посвященных использованию ВСД как источников реактивной мощности, а также определению потерь активной мощности в ВСД, отмечая значительные научные результаты, полученные авторами упомянутых работ, можно сделать следующие выводы.

1. Промышленные предприятия со значительной установленной мощностью ВСД обладают высоким потенциалом энергосбережения и повышения энергоэффективности за счет использования компенсирующей способности этих двигателей. Основным преимуществом ВСД являются незначительные капитальные затраты на 1 квар установленной мощности, так как их установка и эксплуатация обусловлена реализуемыми технологическими процессами предприятий.

2. Анализ существующих методик определения потерь активной мощности в ВСД показал, что известные теоретические и экспериментальные подходы обладают существенными недостатками. Теоретические подходы обладают высокой погрешностью, а экспериментальные – трудоемки, либо вообще нереализуемы. Высокая погрешность теоретических методик объясняется отличием исходных данных, используемых в расчете, от реальных и их нестабильностью в процессе эксплуатации для однотипных двигателей, которые могут достигать 23%.

3. Для определения потерь активной мощности в ВСД в наибольшей мере подходит метод, предложенный В.В. Архипенко, который позволяет учитывать явнополюсность ротора; изменение насыщения магнитной цепи; нагрузку на валу двигателя; изменение напряжения обмоток статора; изменение температуры обмоток и изменение потерь активной мощности в стали магнитопровода. Однако этот метод не позволяет учитывать зависимости параметров режима от управляющих воздействий, так как определение потерь активной мощности осуществляется при заданном режиме.

Таким образом, актуальной научной задачей энергосбережения и повышения энергетической эффективности систем электроснабжения промышленных предприятий является адекватная оценка возможности использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности.

Объект исследования – система электроснабжения промышленного предприятия со значительной установленной мощностью ВСД.

Предмет исследования – методика оценки состояния ВСД, как активного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия.

Цель работы – разработка математического, методического и программного обеспечения, позволяющего повысить эффективность использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.

В рамках сформулированной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Выполнить сравнительный анализ существующих методик определения потерь активной мощности в ВСД, используемых для компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия;

2. Разработать методику и программное обеспечение оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия;

3. Разработать математическую модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, как электротехнического комплекса, состоящего из линии электропередачи (система внешнего электроснабжения), силового трансформатора с РПН, токопроводов, групп высоковольтных синхронных двигателей и комплексной нагрузки, ориентированную на адекватную оценку уровня потерь активной мощности при различных управляющих воздействиях;

4. Разработать программное обеспечение для оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, с использованием которого произвести моделирование режимов работы и последующий анализ полученных результатов.

Научная новизна:

1. Впервые разработана методика оценки состояния ВСД, как активного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия, основанная на методе определения потерь активной мощности в синхронном двигателе, учитывающем явнополюсность ротора, изменение насыщения магнитной цепи, нагрузку на валу двигателя, изменения напряжения обмоток статора, температуры обмоток и потерь активной мощности в стали магнитопровода;

2. Создана математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, позволяющая адекватно оценить потери активной мощности в элементах системы электроснабжения;

3. Предложен алгоритм оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, позволяющий моделировать параметры режима работы и определять потери активной мощности в элементах системы электроснабжения при различных управляющих воздействиях.

Значение для теории заключается в том, что полученные результаты исследований совершенствуют методические подходы к оценке уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами.

Практическая значимость.

1. Разработанная методика оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, может быть использована для различных типов ВСД.

2. Разработанный алгоритм, и на его основе программа «Оценка состояния синхронного двигателя» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680084 от 07.12.2021), могут быть использованы специалистами промышленных предприятий с высокой долей установленной мощности ВСД в качестве основы для решения задач компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в узлах системы электроснабжения, оценки

уровня потерь активной мощности, оптимизации и других, а также, в системах АСУ ТП.

3. Разработана программа определения уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022680603 от 03.11.2022), которая была использована для моделирования режимов работы обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия, с заданным количеством активных элементов, анализ полученных результатов которых показал, что потери активной мощности в элементах системы электроснабжения и активных элементах, существенно зависят от управляющих воздействий, и существуют возможности их снижения для повышения энергетической эффективности функционирования предприятия.

Методы исследования. В работе используются методы теории электрических цепей, теории электрических машин, систем электроснабжения, методы математического моделирования, итерационные методы и методы планирования эксперимента.

Тезисы, выносимые на защиту:

1. Методика оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, учитывает явнополюсность ротора, изменение насыщения магнитной цепи, нагрузку на валу двигателя, изменения напряжения обмоток статора, температуры обмоток и потерь активной мощности в стали магнитопровода, что позволяет рассматривать различные типы ВСД;

2. Математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, позволяющая адекватно оценить потери активной мощности в элементах системы электроснабжения.

3. Алгоритм оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, позволяет моделировать параметры режима работы и определять потери активной мощности в элементах системы электроснабжения при различных управляющих воздействиях.

Личный вклад автора заключается в проведении исследований, разработке методики, выборе методологической и информационной базы, разработке программного обеспечения.

Соответствие диссертации паспорту специальностей. Сведения, содержащиеся в диссертационной работе, соответствуют следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы: п. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, ... математическое ... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п. 4. Исследование ... качества функционирования электротехнических

комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях

Достоверность полученных результатов достигается удовлетворительной сходимостью результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных. Выводы достаточно хорошо коррелируются с результатами, полученными другими исследователями и не противоречат известным положениям науки.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на V международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» в г. Чебоксары в 2021 году, всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» в г. Иркутск в 2023 году и XIX международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный – 2023» в г. Красноярск в 2023 году.

Публикации. По результатам выполненных в работе исследований опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 3 публикации в прочих изданиях.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста и включает введение, четыре главы, основные результаты работы, библиографический список из 101 наименования и 8 приложений. Работа проиллюстрирована 28 рисунками, 3 таблицами. Приложения занимают 12 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, тезисы, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе произведена оценка перспектив применения ВСД как активных элементов в составе систем электроснабжения промышленных предприятий.

ВСД являются активными элементами в составе системы электроснабжения промышленного предприятия и наделяют ее активно-адаптивными свойствами относительно различных отклонений параметров режима от заданных в режиме реального времени.

На основании оценки перспектив применения ВСД обоснована необходимость разработки методики и программного обеспечения оценки состояния ВСД как активного элемента.

Во второй главе разработаны методика и программное обеспечение оценки состояния ВСД как активного элемента.

Под состоянием ВСД понимается совокупность значений параметров режима его работы, а именно: активная мощность, потребляемая из сети P_1 , реак-

тивная мощность Q и потери активной мощности $\Delta p_{сд}$, при изменении управляющих воздействий, по току возбуждения I_2 и по напряжению обмоток статора U_1 , и заданном значении нагрузки на валу. Для оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия в данной работе использована математическая модель, разработанная на основании метода предложенного В.В. Архипенко.

Для удобства использования математической модели были введены следующие обозначения:

– отношение реактивной мощности (Q , квар) к полной номинальной мощности (S_H , кВ · А) ВСД, о. е.

$$\alpha_s = \frac{Q}{S_H}, \quad (1)$$

– отношение активной мощности, потребляемой из сети, к полной номинальной мощности ВСД, о. е.

$$\beta_s = \frac{P_1}{S_H}, \quad (2)$$

– относительное по отношению к номинальному значению тока статора ВСД, о. е.

$$I_{*1} = \sqrt{\frac{\alpha_s^2 + \beta_s^2}{u_*^2}}, \quad (3)$$

где u_* – значение напряжения обмотки статора по отношению к номинальному ВСД, о. е.

– относительное по отношению к номинальному значению тока возбуждения ВСД, о. е.

$$I_{*2} = \frac{I_2}{I_{2.ном}}. \quad (4)$$

Значение α_s может быть как положительным, так и отрицательным или равным нулю. Множеству значений α_s отвечает состояние ВСД:

$$\alpha_s = \begin{cases} \alpha_s < 0, \text{ с отстающим } \cos \varphi \\ \alpha_s = 0, \cos \varphi = 1 \\ \alpha_s > 0, \text{ с опережающим } \cos \varphi \end{cases} \quad (5)$$

После введенных обозначений (1-4) математическая модель имеет следующий вид (6), где: ε_{*0} – относительное значение ЭДС возбуждения с учетом изменения насыщения магнитной цепи ВСД, о. е., $\varepsilon_{*0ном}$ – относительное номинальное значение ЭДС возбуждения с учетом изменения насыщения магнитной цепи ВСД, о. е., ε_* – относительное значение ЭДС возбуждения без учета изменения насыщения магнитной цепи ВСД, о. е., $\Delta\varepsilon_*$ – относительное значение добавочной ЭДС ВСД, зависящей от степени насыщения магнитной цепи, о. е., θ – угол сдвига между ЭДС возбуждения и напряжением статора ВСД, без учета изменения насыщения магнитной цепи, рад, σ_p – угол сдвига между ЭДС Потье и

напряжением статора ВСД, рад, x_d – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси ВСД, о. е., ε_{*p} – относительное значение ЭДС Потье ВСД, о. е., x_p – индуктивное сопротивление Потье ВСД, о. е., x_q – синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси ВСД, о. е., m – относительное значение момента на валу ВСД, о.е., $P_{2н}$ – номинальная механическая мощность на валу ВСД, кВт, Δp_0 – механические потери в ВСД, кВт, Δp_1 – потери активной мощности в обмотке статора ВСД, кВт, Δp_3 – потери активной мощности в стали магнитопровода ВСД, кВт, v_0 – температура охлаждающей среды ВСД, °С, $\tau_{1н}$ – номинальное значение превышения температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды ВСД, °С, $\tau_{2н}$ – номинальное значение превышения температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды ВСД, °С, r_{*1} – относительное по отношению к номинальному значению активного сопротивления фазы статора ВСД, о. е., r_{*2} – относительное по отношению к номинальному значению активного сопротивления обмотки возбуждения ВСД, о. е., $\Delta p_{1н}$ – номинальное значение потерь активной мощности в обмотке статора ВСД, кВт, Δp_2 – потери активной мощности в обмотке возбуждения ВСД, кВт, $\Delta p_{2н}$ – номинальное значение потерь активной мощности в обмотке возбуждения ВСД, кВт, $\Delta p_{3н}$ – номинальное значение потерь активной мощности в стали магнитопровода ВСД, кВт, x_σ – индуктивное сопротивление рассеяния ВСД, о. е., $\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности ВСД, о. е.

$$M_{CD} = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_{*0,ном}^2 \cdot I_{*2}^2 \\ \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_*^2 + (\Delta\varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta\varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p) \\ \varepsilon_* = \frac{x_d \cdot \beta_s \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha_s) \cdot \cos \theta}{u_*} \\ \Delta\varepsilon_* = 2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \varepsilon_{*p} - \varepsilon_{*p}} \\ \varepsilon_{*p} = \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p} \\ \sigma_p = \arctg \left(\frac{x_p \cdot \beta_s}{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s} \right) \\ \theta = \arctg \left(\frac{x_q \cdot \beta_s}{u_*^2 + x_q \cdot \alpha_s} \right) \\ P_1 = m \cdot P_{2,ном} + \Delta p_0 + \Delta p_1 + \Delta p_3 \\ r_{*1} = \frac{235 + v_0 + \tau_{1н} \cdot I_{*1}^2}{235 + v_0 + \tau_{1н}} \quad r_{*2} = \frac{235 + v_0 + \tau_{2н} \cdot I_{*2}^2}{235 + v_0 + \tau_{2н}} \\ \Delta p_1 = \Delta p_{1,ном} \cdot r_{*1} \cdot I_{*1}^2 \quad \Delta p_2 = \Delta p_{2,ном} \cdot r_{*2} \cdot I_{*2}^2 \\ \Delta p_3 = \Delta p_{3,ном} \cdot \frac{x_\sigma^2 \cdot I_{*1}^2 + 2 \cdot x_\sigma \cdot \alpha_s + u_*^2}{x_\sigma^2 + 2 \cdot x_\sigma \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_n)} + 1} \\ \Delta p_{CD} = p_0 + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 \end{array} \right. \quad (6)$$

В качестве исходных данных в разработанной методике необходимо использовать условно-постоянную информацию о ВСД из заводского формуляра, в котором указаны: частота вращения, n_n , об/мин; температура охлаждающей среды, u_0 , °С; номинальные значения мощности синхронного двигателя, $P_{2.ном}$, кВт; напряжения обмоток статора синхронного двигателя, $U_{1.ном}$, кВ; полной мощности синхронного двигателя, S_n , кВ·А; коэффициента мощности синхронного двигателя, $\cos \varphi_n$, о. е.; синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям, x_d , x_q , о. е.; индуктивное сопротивление Потье; номинальные значения превышения температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды, $\tau_{1н}$, °С; превышения температуры обмотки ротора над температурой охлаждающей среды, $\tau_{2н}$, °С; потерь активной мощности на трение и вентиляцию, потерь активной мощности в обмотках статора, потерь активной мощности в обмотке ротора; потерь в стали магнитопровода, кВт.

Задача оценки состояния ВСД на основании математических зависимостей (6) заключается в том, чтобы для заданных значений β_s , I_{*2} и u_* найти значения P_1 , Q и $\Delta p_{сд}$.

Для оценки состояния ВСД необходимо решить следующую систему уравнений относительно α_s :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_{*0.ном}^2 \cdot I_{*2}^2 \\ \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_*^2 + (\Delta\varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta\varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p) \\ \varepsilon_* = \frac{x_d \cdot \beta_s \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha_s) \cdot \cos \theta}{u_*} \\ \Delta\varepsilon_* = 2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \varepsilon_{*p} - \varepsilon_{*p}} \\ \varepsilon_{*p} = \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p} \\ \sigma_p = \arctg \left(\frac{x_p \cdot \beta_s}{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s} \right) \\ \theta = \arctg \left(\frac{x_q \cdot \beta_s}{u_*^2 + x_q \cdot \alpha_s} \right) \end{array} \right. \quad (7)$$

Данные уравнения являются частью системы уравнений (6).

Если рассмотреть 1-е и 2-е уравнения системы (7) через функции одной $\psi_1(I_{*2})$ и нескольких переменных $\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u)$ соответственно, то

$$\psi_1(I_{*2}) = \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_{*0.ном}^2 \cdot I_{*2}^2, \quad (8)$$

$$\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u_*) = \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_*^2 + (\Delta\varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta\varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p). \quad (9)$$

Это позволяет, при условии равенства функций $\psi_1(I_{*2})$ и $\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u_*)$, установить аналитически связи β_s , α_s , u_* и I_{*2} .

Если значения функций (8) и (9) равны, а их разность записать через функцию $\psi_3(I_{*2}, \beta_s, \alpha_s, u_*)$, тогда

$$\psi_3(I_{*2}, \beta_s, \alpha_s, u_*) = \psi_1(I_{*2}) - \psi_2(\beta_s, \alpha_s, u_*) = 0. \quad (10)$$

Решение функции (10), согласно разработанной методике, описанной ниже, относительно α_s позволяет оценивать состояния ВСД. Для этого переменные ε_* , ε_{*0} , $\Delta\varepsilon_*$, содержащиеся в формулах (8) и (9), следует выразить через первые четыре выражения системы (6).

Методика оценки состояния ВСД состоит из двух этапов:

Этап №1. Определение параметров номинального режима.

Необходимо принять:

$$\alpha_s = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}, \quad (11)$$

где $\cos \varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности ВСД, о. е.

$$\beta_s = \cos \varphi_H, \quad (12)$$

$$u_* = 1. \quad (13)$$

Из математической модели (6), используя выражения (11-13), определить θ , σ_p , ε_{*p} , $\Delta\varepsilon_*$, ε_* , ε_{*0} . Принять:

$$\varepsilon_{*0.ном} = \varepsilon_{*0}. \quad (14)$$

Этап №2. Определение параметров заданного режима.

Для определения параметров заданного режима необходимо задаться значениями:

- 1) относительного значения тока возбуждения I_{*2} , о. е.;
- 2) относительного значения напряжения обмотки статора ВСД (в долях от номинального значения) u_* , о. е.;
- 3) относительного значения момента на валу ВСД (в долях от номинального значения) m , о. е.

Значение m задается для определения P_1 , а далее β_s по (6) и по (2) соответственно. Однако, для определения P_1 необходимо задаться начальными значениями $\Delta p_1 = \Delta p_{1.ном}$ и $\Delta p_3 = \Delta p_{3.ном}$.

Значения I_{*2} и u_* задаются для решения уравнения (10) относительно α_s с использованием математической модели (6). Далее по (3) определяются I_{*1} , по (6) r_{*1} , r_{*2} , Δp_2 и уточняются значения Δp_1 и Δp_3 .

По определенным значениям параметров заданного режима α_s , Δp_1 , Δp_2 и Δp_3 рассчитываются по (6) значения P_1 , по (1) Q и по (6) $\Delta p_{сд}$.

Функция (10) является нелинейной относительно функции (9). Её решение осуществить аналитическими методами достаточно сложно, так как значение α_s является неизвестным. Учитывая то, что функция (9) является дифференцируемой и существует возможность выбора начального приближения α_0 , целесообразно при поиске корней функции (10) использовать, один из самых эффективных методов решения нелинейных задач, итерационный метод Ньютона.

Метод сводится к следующему (решение относительно α_s):

- 1) имея начальное приближение α_0 решение функции (10), последующие приближения α определяются:

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j - \frac{\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u_*)}{\psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u_*)} \quad (15)$$

где j – номер итерации; $\psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u_*)$ – частная производная функции $\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u_*)$ по α_s .

Начальное приближение α_0 без учёта явнополюсности ротора ($x_d = x_q$) и изменения насыщения магнитной цепи ($\Delta \varepsilon_* = 0$), определяется по (10) с учетом (7-9):

$$\alpha_0 = \frac{u_*}{x_d} \cdot \sqrt{\varepsilon_{*ном}^2 \cdot I_{*2}^2 - x_d^2 \cdot \frac{\beta_s^2}{u_*^2} - \frac{u_*^2}{x_d}}, \quad (16)$$

$$\varepsilon_{*ном} = x_d^2 + 2 \cdot x_d \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} + 1. \quad (17)$$

2) за решение принимается n -ое приближение α_n когда:

$$\psi_3(I_{*2}, \beta_s, \alpha_s, u_*) \leq \zeta. \quad (18)$$

где ζ – заданная точность решения.

Блок-схема алгоритма оценки состояния ВСД при заданных значениях I_{*2} , u и t , изображена на рисунке 1.

На основании представленного алгоритма разработана программа для ЭВМ «Оценка состояния синхронного двигателя», с помощью которой была произведена оценка регулирующих эффектов по току возбуждения и напряжению обмоток статора. На рисунках 2 и 3 изображены графические зависимости мощности Q и потерь активной мощности $\Delta p_{сд}$ от напряжения статора u_* и тока возбуждений I_{*2} ВСД соответственно.

Из рисунка 2 видно, что регулирующий эффект по току возбуждения ВСД имеет, по сравнению с регулирующим эффектом по напряжению статора, большую степень изменения реактивной мощности. Следует отметить, что потери активной мощности в ВСД $\Delta p_{сд}$ при изменении напряжения обмоток статора u_* в диапазоне от 0,9 до 1,1 о.е. и тока возбуждения I_{*2} в диапазоне от 0,8 до 1,0 о.е. (рисунок 3) имеют наименьшие значения, по сравнению со всеми определенными, а при токе возбуждения $I_{*2} = 0,8$ о.е. потери практически не изменяются. Это обстоятельство говорит о том, что потери активной мощности или расхода активной мощности на производство реактивной значительно ниже при изменении напряжения статора u_* , чем при изменении тока возбуждения I_{*2} . Например, при токах возбуждения I_{*2} 0,8 и 1,0 о.е. и изменении напряжения статора u в диапазоне от 0,9 до 1,1 о.е. затраты активной мощности на производство реактивной составляют от 0,005 до 0,017 кВт/квар, что практически соизмеримо с затратами в БСК, а если сравнивать затраты при изменении тока возбуждения I_{*2} в диапазоне от 0,8 до 1,0 о.е. и неизменных значениях напряжения статора u_* , то они составят от 0,025 до 0,05 кВт/квар.

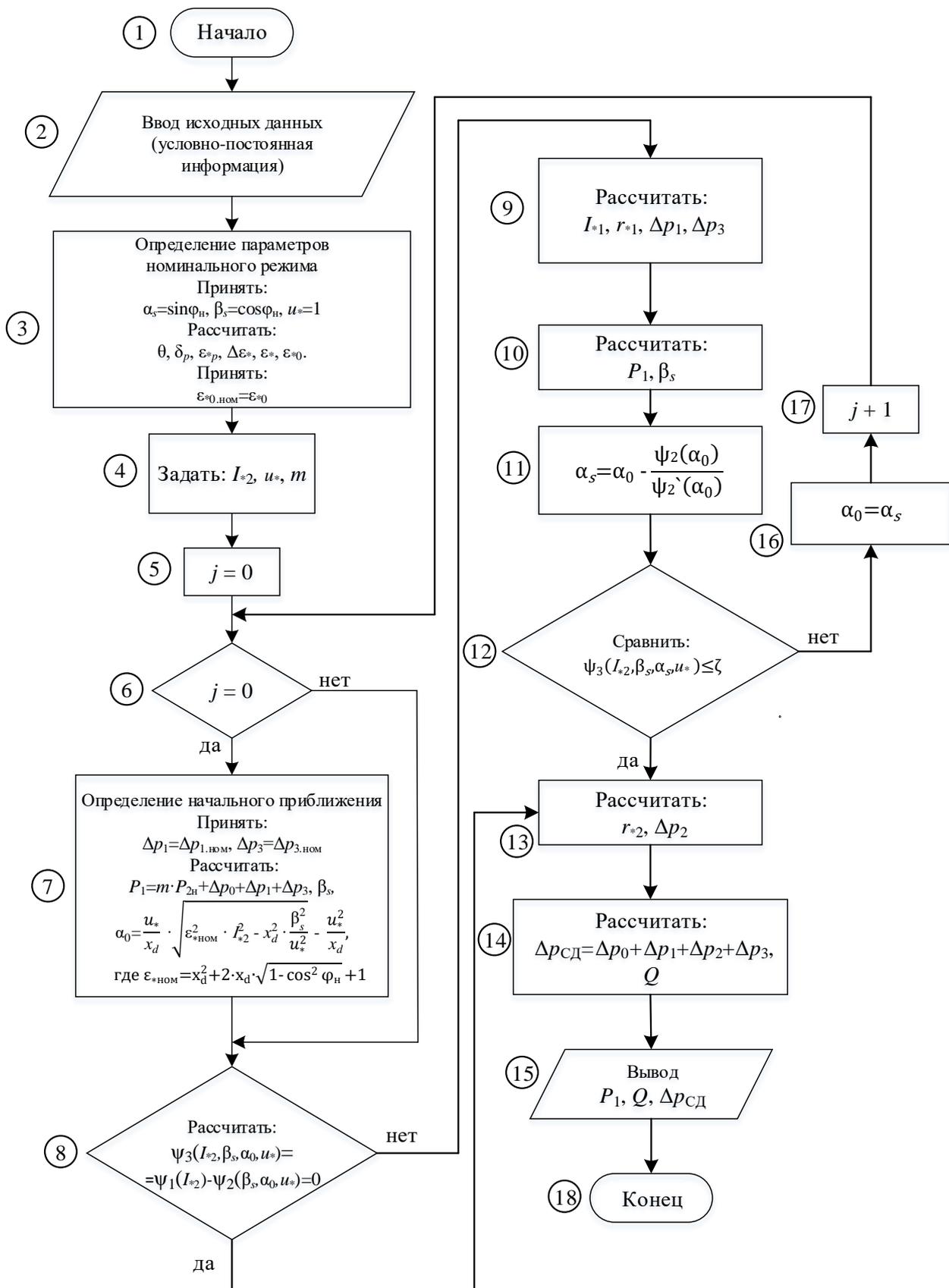


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма оценки состояния ВСД

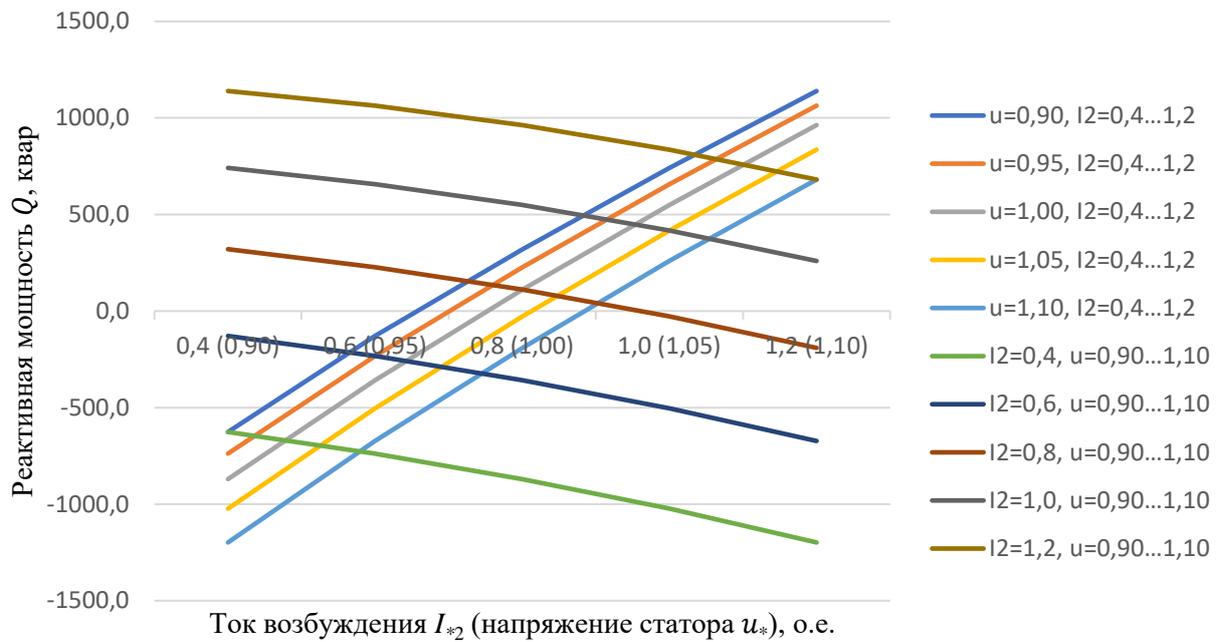


Рисунок 2 – Графические зависимости реактивной мощности от тока возбуждения I_{*2} и напряжения статора u_* ВСД

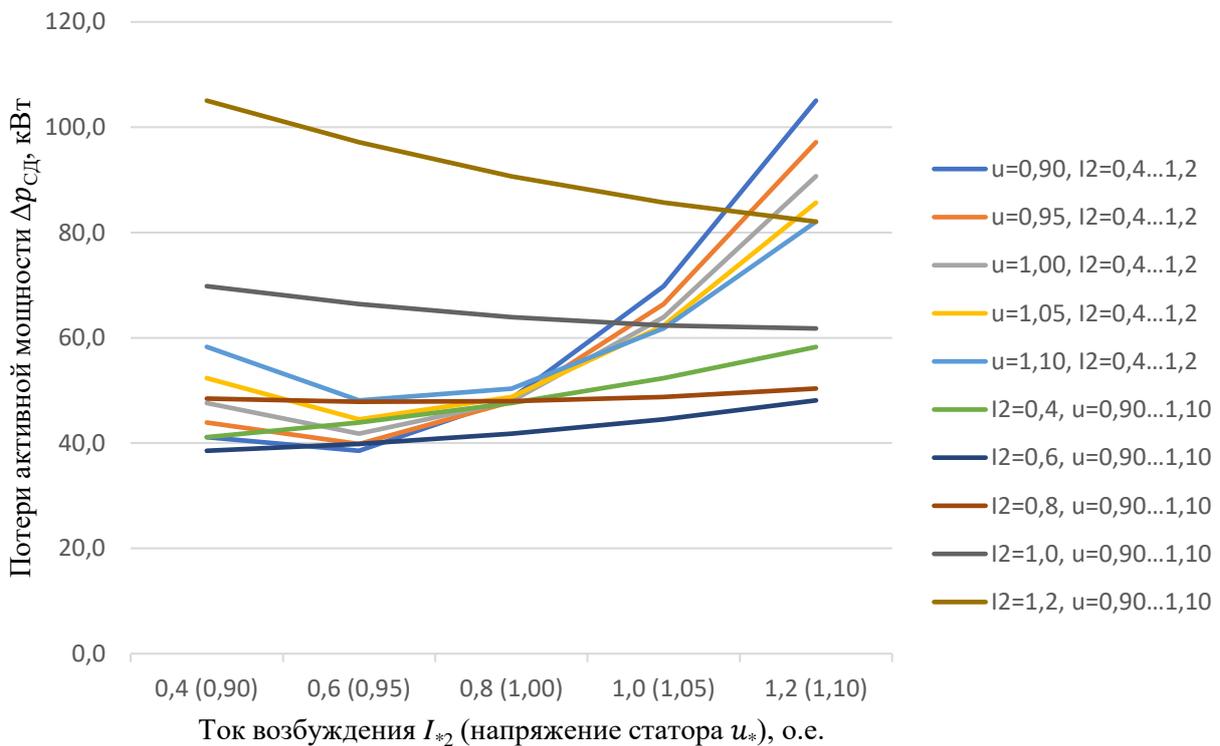


Рисунок 3 – Графические зависимости потерь активной мощности $\Delta P_{сд}$ от тока возбуждения I_{*2} и напряжения статора u_* ВСД

Третья глава посвящена разработке математической модели системы электроснабжения промышленного предприятия для оценки уровня потерь активной мощности.

Системы электроснабжения промышленных предприятий со значительной установленной мощности ВСД имеют некоторую схожесть по своим структурам, в частности, наличие в системах электроснабжения однотипных элементов, таких как трансформаторы, обеспечивающие регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) и устанавливаемые на главной понизительной подстанции (ГПП); различные участки токопроводов между узлами систем электроснабжения и групп электроприемников с активными элементами. На этом основании целесообразно рассматривать систему электроснабжения, имеющую некоторую обобщенную структуру. В системах электроснабжения промышленных предприятий, как правило, применяются схемы электрических соединений на ГПП типа 4Н, когда электроснабжение осуществляется через 2 блока (линия – трансформатор). Данная схема позволяет в нормальном режиме эксплуатации ГПП обеспечить питание от двух независимых источников, что позволяет каждый блок рассматривать в отдельности, то есть при различных не нормальных режимах работы ГПП будет изменяться только конфигурация электрической схемы питания электроприемников.

Обобщенная структура системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами (рисунок 4) включает внешнюю энергосистему: GS – источник бесконечной мощности, W_0 – линию электропередач (ЛЭП) внешней энергосистемы (система внешнего электроснабжения); систему внутреннего электроснабжения: T – трансформатор с РПН, установленный на ГПП, W_i, W_j – участки токопровода системы электроснабжения (L – количество радиальных токопроводов, F – количество магистральных токопроводов); электроприемники: группа однотипных ВСД (активные элементы) (M – количество ВСД в группе) и комплексная нагрузка.

Для разработки математической модели обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами была создана расчетная схема замещения (рисунок 5). Математическая модель имеет вид:

$$M_{\text{осэпп}} = \begin{cases} M_T \\ M_{w,i(j)}, (i = 0 \dots L; j = 1 \dots F) \\ M_{G,j}, (j = 1 \dots F) \\ M_{CD,j,k}, (k = 1 \dots M) \end{cases} \quad (18)$$

где M_T – математическая модель трансформатора с РПН; $M_{w,i(j)}$ – математическая модель i -го (j -го) элемента системы электроснабжения промышленного предприятия; i – порядковый номер элемента системы электроснабжения промышленного предприятия; L – количество элементов системы электроснабжения промышленного предприятия, шт.; $M_{G,j}$ – математическая модель j -ой группы электроприемников; j – порядковый номер группы электроприемников; F – количество групп электроприемников системы электроснабжения промышленного

предприятия, шт.; $M_{СД,j,k}$ – математическая модель k -го ВСД j -ой группы электроприемников; k – порядковый номер ВСД j -ой группы электроприемников; M – количество ВСД j -ой группы электроприемников.

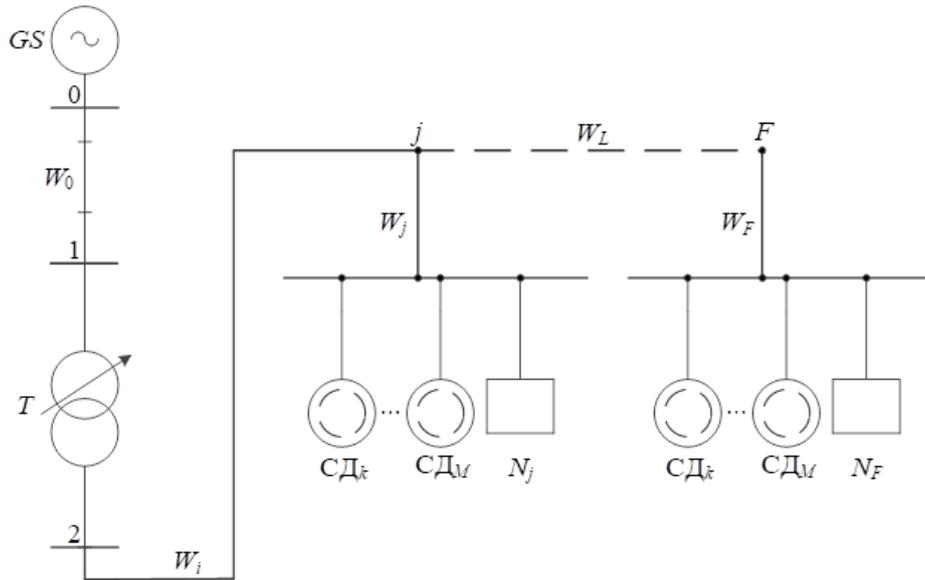


Рисунок 4 – Структура обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

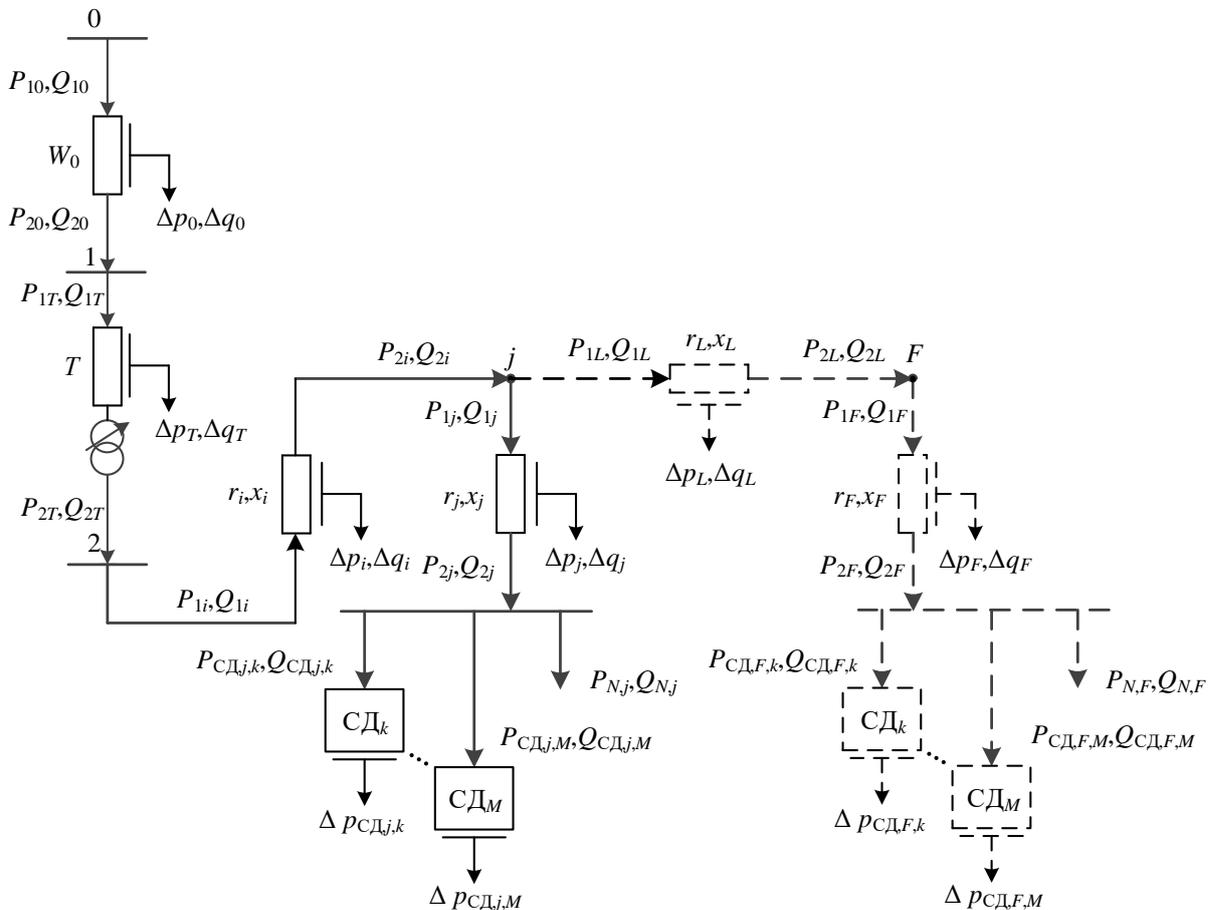


Рисунок 5 – Расчетная схема замещения обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

Решение задачи оценки уровня потерь активной мощности в обобщенной системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами сводится к определению параметров состояния режима работы, а именно, потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в элементах и напряжений в узлах системы электроснабжения зависящих от управляющих воздействий.

Оценка уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами производится при заданных значениях токов возбуждения групп однотипных ВСД и коэффициента трансформации трансформатора с РПН, установленного на ГПП.

Коэффициент трансформации трансформатора с РПН зависит от положения регулировочной ступени и определяется:

$$k_T = \frac{U_{1.\text{НОМ}} + (10 - R) \cdot \frac{\Delta k_T}{100} \cdot U_{1.\text{НОМ}}}{U_{2.\text{НОМ}}}, \quad (19)$$

где $U_{1.\text{НОМ}}$ – номинальное высшее напряжение трансформатора с РПН, кВ; $U_{2.\text{НОМ}}$ – номинальное низшее напряжение трансформатора с РПН, кВ; Δk_T – шаг коэффициента трансформации, %.

Относительное значение тока возбуждения группы однотипных ВСД j -ой группы электроприемников определяется:

$$I_{*2,j} = I_{*2,j,k} = \dots = I_{*2,j,M}. \quad (20)$$

Выражение (20) показывает, что токи возбуждения группы однотипных ВСД j -ой группы электроприемников одинаковые по величине. Это условие позволяет ограничиться количеством ВСД в узле нагрузки с одинаковыми параметрами режима работы.

Оценка состояний осуществляется на основе математической модели (18) с применением методики расчета установившегося режима разомкнутой электрической сети по заданным значениям нагрузок и напряжению центра питания. Методика основывается на итерационных расчетах, позволяющих уточнять параметры установившегося режима до достижения заданной точности. Как известно, метод итераций является разновидностью численных методов решения системы алгебраических уравнений. При использовании такого метода находится приближённое значение величины, которое используется для нахождения другого, более точного значения.

Для итерационных расчетов необходимо задаться начальным приближением напряжений (номинальное линейное напряжение) во всех узлах системы электроснабжения. Начальное приближение напряжения в центре питания задается величиной $U_0^{(0)}$, а в других узлах по выражениям (19-21). Верхний индекс $U_0^{(y)}$, заключенный в скобки, обозначает порядковый номер итерации, где 0 – номер начальной (нулевой) итерации. Обозначение узлов системы электроснабжения представлено на рисунке 5.

$$U_1^{(0)} = U_0^{(0)} = U_{GS}, \quad (21)$$

где U_{GS} – напряжение центра питания, кВ.

$$U_2^{(0)} = \frac{U_1^{(0)}}{k_T}, \text{ где } k_T = \varphi(R), \quad (22)$$

$$U_{j+2}^{(0)} = U_{CD,j}^{(0)} = U_2^{(0)}, \text{ где } j = 1 \dots F. \quad (23)$$

Далее производится расчет потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в элементах системы электроснабжения.

Для расчета потокораспределений и потерь активной мощности в ВСД по (6) и методике, изложенной в главе 2, при заданных соответствующих значениях $U_{CD,j}^{(y)}$ примем, что $m_{j,k}$ для всех однотипных ВСД j -ой группы электроприемников одинаковый. Тогда:

$$m_j = m_{j,k} = \dots = m_{j,M}. \quad (24)$$

Блок-схема алгоритма моделирования состояний системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами при изменении управляющих воздействий изображена на рисунке 6.

Выражения, характеризующие этапы методики расчета подробно описаны в главе.

В четвертой главе разработано программное обеспечение для оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, с использованием которого произведено моделирование режимов работы и анализ полученных результатов.

На основании представленного в главе 3 алгоритма (рисунок 6) разработана программа для ЭВМ «Программа определения уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями».

Моделирование режимов работы система электроснабжения промышленного предприятия произведены для случаев, когда активные элементы работают как в режиме компенсации реактивной мощности, так и потребления реактивной мощности из сети.

Для моделирования использовались следующие исходные данные: *линия электропередач*: $l=100$ км, $R_0=0,198$ Ом/км, $X_0=0,42$ Ом/км, $B_0=0,0000027$ См/км; *трансформатор с РПН*: $S_{T,ном}=40000$ кВ·А; $U_{ВН,ном}=115$ кВ; $U_{НН,ном}=6,3$ кВ, РПН $9 \pm$ положений (1,78 %), $U_{КЗ}=11$ %, $I_{ХХ}=1$ %, $\Delta P_{ХХ}=36$ кВт, $\Delta P_{КЗ}=172$ кВт; *участки токопровода*: 1-й участок магистрального токопровода: $l = 0,1$ км, $R_0=0,129$ Ом/км, $X_0=0,071$ Ом/км, 2-й участок магистрального токопровода: $l=0,2$ км, $R_0=0,129$ Ом/км, $X_0=0,071$ Ом/км, 3-й участок магистрального токопровода: $l=0,2$ км, $R_0=0,129$ Ом/км, $X_0=0,071$ Ом/км, 1 (2 и 3) участок радиального токопровода (участок токопровода представлен токоограничивающим реактором): $n=1$ шт., $R_0=0,01$ Ом, $X_0=0,35$ Ом; *узлы нагрузки*: 1-й узел нагрузки: $m = 0,5$ о.е., $n_{CD} = 4$

шт., $P_{кн} = 150$ кВт, $Q_{кн} = 75$ квар, 2-й узел нагрузки: $m = 0,7$ о.е., $n_{сд} = 2$ шт., $P_{кн} = 50$ кВт, $Q_{кн} = 25$ квар, 3-й узел нагрузки: $m = 0,9$ о.е., $n_{сд} = 3$ шт., $P_{кн} = 100$ кВт, $Q_{кн} = 50$ квар; центр питания: $U_{GS} = 115$ кВ; сети ВН и НН: $U_{ВН} = 115$ кВ, $U_{НН} = 6,3$ кВ.

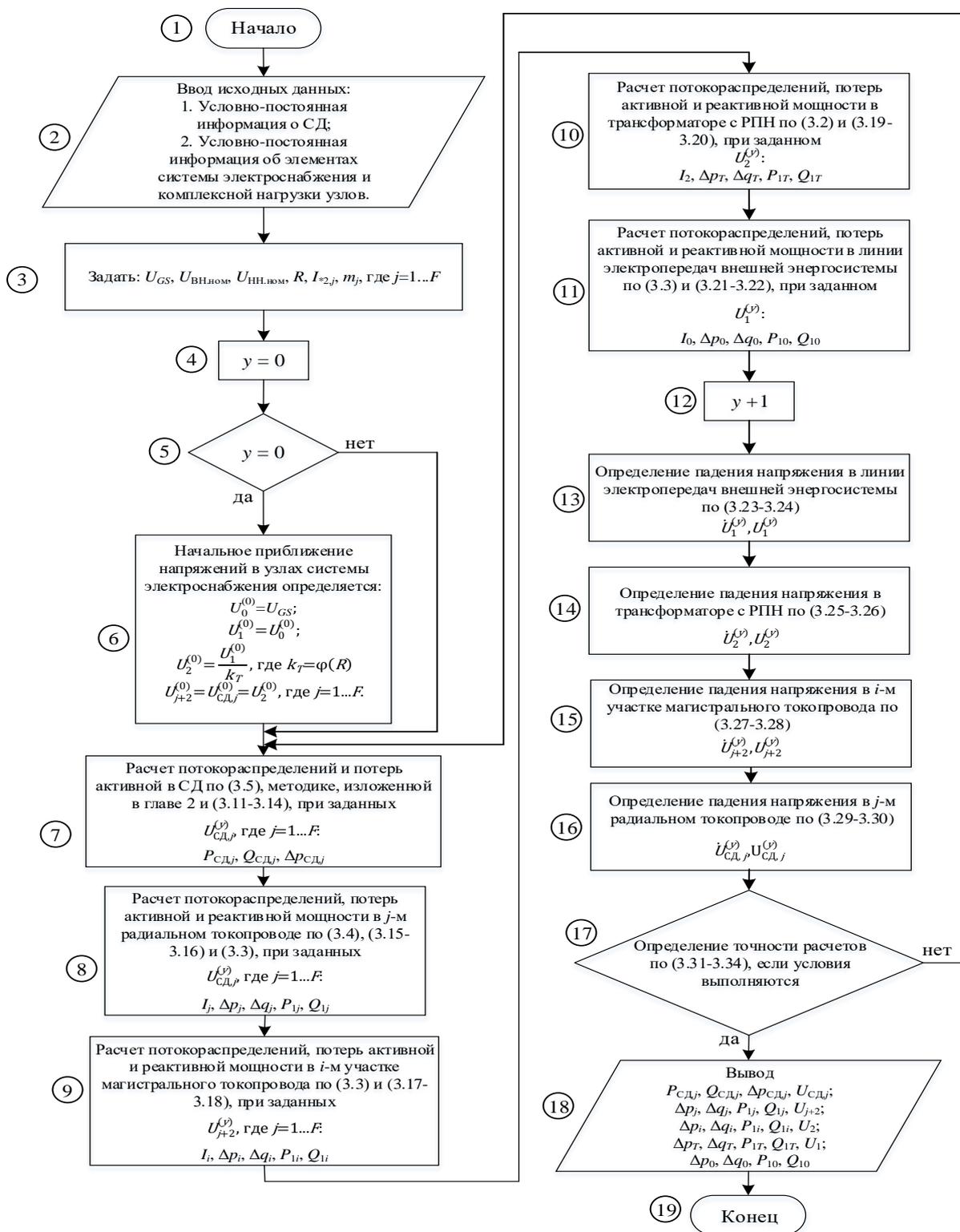


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма моделирования состояний системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

Для анализа уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами был произведен вычислительный эксперимент с использованием теории полного факторного эксперимента.

План полного факторного эксперимента, на основании которого осуществлен анализ, включает в себя:

1) количество факторов $K = 2$, к ним относятся токи возбуждения групп ВСД I_{*2} и регулировочное положение отпайки РПН трансформатора R ;

2) количество откликов $G = 13$, данные параметры описаны в Подпункте 2 Главы 4 диссертации.

3) количество уровней факторов $M = 5$, при этом количество проводимых опытов будет составлять $N = 25$.

4) границы изменения факторов: токи возбуждения групп ВСД I_{*2} , от 0,6 до 1,0; положения регулировочной ступени РПН трансформатора R (кВ): 6 (6,6), 9 (6,3), 12 (6,0), 15 (5,7) и 18 (5,4).

План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента для системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами представлены в таблице 1.

Изображенная на рисунке 7 структура потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятий с активными элементами показывает, что при изменении управляющих воздействий в заданных диапазонах, согласно плану эксперимента по отношению к суммарным потерям в системе электроснабжения, потери активной мощности в элементах распределительной сети изменяются в пределах от 4,0 до 8,8 %; суммарные потери активной мощности в ВСД от 62,7 до 81,1 %; потери активной мощности в трансформаторе с РПН от 5,3 до 7,4 %; а потери активной мощности в элементах системы внешнего электроснабжения от 9,2 до 21,7 %.



Рисунок 7 – Структура потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

Таблица 1 – План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента для системы электро-снабжения промышленного предприятия с активными элементами

Оп ыт	I_2 , о. е.	R , отп	U_2 , кВ	P_{2T} , кВт	Q_{2T} , квар	U_1 , кВ	P_{1T} , кВт	Q_{1T} , квар	P_{10} , кВт	Q_{10} , квар	$\Sigma\Delta p_i + \Sigma\Delta p_j$, кВт	$\Sigma\Delta p_{сд,j}$, кВт	Δp_T , кВт	Δp_0 , кВт	$\Sigma\Delta p$, кВт
1	0,6	6	6,6	6510,7	5794,4	112,9	6554,1	6401,1	6684,4	6677,5	50,4	377,2	43,4	130,3	601,2
2		9	6,3	6507,4	4482,7	113,2	6549,3	5050,3	6654,9	5274,4	45,8	378,5	41,9	105,6	571,8
3		12	6,0	6514,9	3346,1	113,5	6555,9	3888,8	6645,2	4078,3	43,8	388,0	41,0	89,3	562,1
4		15	5,6	6533,8	2402,9	113,7	6574,4	2931,3	6653,7	3099,6	44,2	406,5	40,6	79,4	570,6
5		18	5,4	6553,1	1890,6	113,8	6593,5	2413,8	6668,9	2573,7	45,9	424,1	40,4	75,4	585,8
6	0,7	6	6,6	6488,0	3934,4	113,4	6529,4	4488,1	6626,1	4693,3	38,1	391,9	41,4	96,7	568,1
7		9	6,3	6484,9	2583,6	113,7	6525,5	3112,7	6605,6	3282,7	35,7	391,3	40,6	80,1	547,6
8		12	6,0	6492,7	1408,6	113,9	6532,9	1925,4	6603,7	2075,5	35,8	398,9	40,2	70,8	545,7
9		15	5,7	6511,9	427,6	114,1	6552,0	940,6	6618,6	1081,9	38,5	415,4	40,1	66,6	560,6
10		18	5,4	6543,0	-342,4	114,3	6583,2	172,1	6649,0	311,5	43,5	441,6	40,2	65,7	591,0
11	0,8	6	6,6	6487,1	2151,6	113,8	6527,5	2675,2	6603,7	2836,7	30,8	430,9	40,4	76,1	578,3
12		9	6,3	6484,9	766,8	114,1	6525,0	1279,8	6592,3	1422,5	31,0	428,6	40,1	67,3	566,9
13		12	6,0	6493,7	-440,8	114,3	6533,8	72,2	6598,5	209,4	33,9	434,4	40,2	64,7	573,2
14		15	5,7	6513,9	-1453,2	114,5	6554,5	-933,6	6620,6	-793,1	39,5	449,1	40,5	66,2	595,3
15		18	5,4	6546,2	-2254,1	114,7	6587,1	-1724,7	6656,9	-1576,6	47,4	473,4	40,9	69,8	631,6
16	0,9	6	6,7	6507,4	443,1	114,1	6547,5	956,0	6614,1	1097,2	27,8	494,3	40,1	66,6	628,8
17		9	6,4	6506,4	-971,5	114,4	6546,8	-455,7	6611,9	-317,5	30,9	490,3	40,3	65,1	626,7
18		12	6,1	6516,8	-2206,9	114,7	6557,6	-1679,2	6626,6	-1532,8	37,1	494,4	40,9	69,0	641,4
19		15	5,8	6538,8	-3245,2	114,9	6580,4	-2700,7	6656,3	-2539,7	46,1	507,4	41,6	75,9	671,1
20		18	5,4	6572,9	-4070,9	115,0	6615,3	-3508,4	6699,2	-3330,4	57,7	530,0	42,4	83,9	714,0
21	1,0	6	6,7	6548,1	-1194,0	114,5	6588,5	-675,2	6654,8	-534,6	28,5	582,0	40,5	66,3	717,2
22		9	6,4	6548,8	-2634,7	114,8	6590,0	-2099,9	6661,9	-1947,3	34,9	576,4	41,2	71,9	724,3
23		12	6,1	6561,1	-3893,8	115,0	6603,3	-3335,6	6685,2	-3161,8	44,6	578,9	42,2	81,9	747,6
24		15	5,8	6585,4	-4953,4	115,2	6628,7	-4368,7	6722,7	-4169,2	57,5	590,3	43,3	94,0	785,1
25		18	5,5	6622,1	-5798,2	115,4	6666,5	-5187,7	6772,6	-4962,5	73,3	611,3	44,4	106,1	835,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в разработке математического, методического и программного обеспечения, позволяющего обосновать эффективность использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.

В работе решены следующие задачи:

1. Впервые разработана методика оценки состояния ВСД, которая позволила создать основу для рассмотрения двигателя в качестве активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия. Данная методика может применяться к различным типам ВСД, за счет учета множества факторов.

2. Разработана программа «Оценка состояния синхронного двигателя» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021680084 от 07.12.2021), которая позволяет производить оценку параметров состояния заданного режима ВСД, а также моделировать множество режимов для исследования регулирующих эффектов по управляющим воздействиям.

3. Разработана математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, которая ориентирована на адекватную оценку уровня потерь активной мощности при различных управляющих воздействиях. Особенность математической модели заключается в том, что она позволяет учитывать потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения;

4. Разработана программа «Программа оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№2022680603 от 03.11.2022), позволяющая моделировать режимы работы обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия, с заданным количеством активных элементов, что дает возможность анализировать влияние управляющих воздействий на потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения для повышения энергетической эффективности функционирования промышленного предприятия.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Направлением развития полученных решений является разработка алгоритмов управления процессами электроснабжения на основе методов оптимизации по критерию минимума потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, из перечня ВАК:

1. Филатов, А.Н. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронных двигателей / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова,

В.И. Пантелеев, Р.А. Петухов, **Г.А. Пилюгин** // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. - № 8 (6). – С. 795-801.

2. **Пилюгин, Г.А.** Методика оценки состояния синхронного двигателя при изменении управляющих воздействий / Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. - № 1 (58). – С. 84-91.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

3. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2021680084. Оценка состояния синхронного двигателя / Пантелеев В.И., Филатов А.Н., **Пилюгин Г.А.**; заявители Пантелеев В.И., Филатов А.Н., Пилюгин Г.А.; заявл. 01.12.2021, опубл. 07.12.2021.

4. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2022680020. Программа определения уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями / **Пилюгин Г.А.**, Пантелеев В.И., Филатов А.Н.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ); заявл. 26.10.2022, опубл. 03.11.2022.

В других изданиях:

5. **Пилюгин, Г.А.** Моделирование синхронного двигателя как активно-адаптивного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия / Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Материалы V Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 53-60.

6. **Пилюгин, Г.А.** Обобщенная математическая модель системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами / Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2023. – Т. 1.–С. 347-350.

7. **Пилюгин, Г.А.** Функциональные задачи управления процессами электроснабжения промышленного предприятия / Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив – 2023». – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. – С. 3578-3581.