

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

ЕЛ ДЖУФУТ Салех Абдель-Хамид Халаф

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В УЗЛАХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ДВИГАТЕЛЬНОЙ
НАГРУЗКОЙ**

Специальности:

**05.09.03 - "Электротехнические комплексы и системы, включая их
управление и регулирование";**

**05.14.02 - "Электрические станции (электрическая часть), сети,
электроэнергетические системы и управление ими"**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

621.3-1
621.31

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00743844 (U)

Диссертация является рукоп

Диссертационная работа введена в Донецком государственном
техническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
академик Украинской технологической академии
Сивокобыленко Виталий Федорович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
академик Украинской технологической академии
Жуков Станислав Федорович;
кандидат технических наук **Коваль Александр Юрьевич.**

Ведущее предприятие: **Донецкий проектно-изыскательский,
научно-исследовательский институт "Теплоэнергопроект",
г. Донецк.**

Защита состоится "9" "01" 1997г. в 11 час. на заседании
специализированного совета К.06.04.04 в Донецком государственном
техническом университете по адресу: г. ДОНЕЦК, УЛ. АРТЕМА 58, АУД.
1201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого
государственного технического университета.

Автореферат разослан "4" "12" 1996г.

Ученый секретарь специализированного совета, кандидат
технических наук, доцент _____ А.М. Ларин

/подпись/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задача развития энергетического производства стоит не только перед промышленно развитыми странами, но и является первой необходимостью для решения острых социальных и экономических проблем, возникающих перед развивающимися странами. Примером таких стран является Иорданское Хашимитское Королевство. Государственным планом Иордании ставится задача быстрого увеличения установленной мощности страны, которая не превысила 350 МВт в 1965 г., достигла 1000 МВт в 1989 г. и составила 1200 МВт в 1995 г. Основными потребителями электроэнергии являются электродвигатели, служащие приводом механизмов различного назначения.

Для повышения надежности работы разветвленных систем электроснабжения с двигательной нагрузкой (РСДН) с помощью современных быстродействующих микропроцессорных и цифровых устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) требуется совершенствование и создание новых методов расчета переходных процессов (ПП), позволяющих получить мгновенные значения режимных параметров.

При исследовании динамических характеристик в РСДН, при симметричных и несимметричных ПП, широко применяют математическое моделирование. Повышение точности расчетов на математических моделях связано с дальнейшим их совершенствованием и разработкой методов автоматизации их формирования, к недостаткам которых в настоящее время относятся: большое количество вычислительных операций; жесткая привязка к конкретной заданной системе электроснабжения и исследования только симметричных ПП для конкретного вида нагрузки.

Поэтому проблема совершенствования математических моделей РСДН являются **актуальной**.

Целью работы является совершенствование математических моделей РСДН на основе разработки методов автоматизации их формирования и возможности анализа мгновенных значений параметров как в симметричных, так и несимметричных режимах, что позволяет установить закономерности поведения двигательной нагрузки в различных режимах, уточнить параметры срабатывания РЗА и тем самым повысить надежность РСДН.

Идея работы состоит в представлении РСДН в виде полных дифференциальных уравнений (ДУ) основных ее элементов

ЛНБ ім. В. Степаненко
АН України

(асинхронные двигатели, синхронные двигатели, трансформаторы, активно-индуктивная нагрузка и т. д.) и уравнений связи между ними. При этом из решения первых находят переменные состояния элементов, а из решения вторых - определяющие координаты, в качестве которых принимают узловые напряжения или контурные токи.

Задачи исследования, сформулированные в диссертационной работе состоят в следующем:

- выбор математических моделей основных элементов РСДН;
- разработка методов автоматизации формирования математических моделей заданных структур РСДН сложных конфигураций;
- разработка алгоритма расчета ПП в РСДН при симметричных и несимметричных коротких замыканиях (КЗ), а также при переключениях питания;
- анализ поведения РСДН при возникновении и отключении симметричных и несимметричных КЗ в питающей сети, и, в частности, при однофазном КЗ через дугу;
- разработка дискретной математической модели РСДН, описываемой жесткими системами ДУ, решаемыми с использованием неявного метода Эйлера.

Методы исследования: решение поставленных вопросов осуществлено на базе методов математического моделирования, основанных на использовании общей теории ПП машин переменного тока, теоретических основ электротехники а также вычислительной математики (численных методов анализа, методов оптимизации и минимизации).

Основные научные результаты, их новизна и положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель многоузловой РСДН, отличающаяся тем, что с целью повышения точности в ней электродвигатели представлены с учетом явления вытеснения тока в роторе с помощью многоконтурных схем замещения, учтены группы соединения обмоток питающих трансформаторов и режимы включения и отключения коммутационной аппаратуры, что позволяет получить мгновенные значения режимных параметров и выполнить анализ ПП в режимах однофазного, двухфазного, двухфазного на землю, трехфазного КЗ, пуска, индивидуального и группового выбега и самозапуска электродвигателей; автоматического повторного включения (АПВ) и автоматического включения резерва (АВР).

2. Методы автоматического формирования математических моделей РСДН, основанные на использовании топологической схемы соединения элементов, отличающиеся тем, что выбор переменных состояния (токов индуктивностей и напряжений емкостей) производится на основе построения дерева графа заданной схемы с учетом установленного приоритета разного типа элементов и путем элементарных преобразований матрицы соединения.

3. Результаты исследований режимов работы двигательной нагрузки при симметричных и несимметричных КЗ в питающей сети и зависимости времени устойчивого горения дуги от суммарной мощности двигательной нагрузки при наличии однофазного дугового КЗ в питающей сети, на основании чего предложена и реализована на ЭВМ методика определения минимального времени срабатывания АПВ на ЛЭП, питающих двигательную нагрузку.

4. Дискретная математическая модель системы электроснабжения, описываемой жесткими системами ДУ, основанная на использовании неявного метода Эйлера и позволяющая повысить численную устойчивость при анализе различных режимов работы.

Научное значение работы заключается в совершенствовании и разработке методов автоматизации формирования математических моделей РСДН сложных конфигураций, основанных на полных ДУ и предназначенных для исследования стационарных, симметричных и несимметричных переходных режимов работы ее элементов.

Практическая ценность работы заключается в разработке алгоритмов и программ для анализа установившихся и переходных режимов работы РСДН как на стадии проектирования, так и эксплуатации, а также в проведении исследований поведения двигательной нагрузки в симметричных и несимметричных переходных режимах и разработке рекомендаций для уточнения параметров срабатывания устройств РЗА и повышения надежности работы РСДН в целом.

Результаты работы **использованы** в научно-исследовательской работе кафедры "Электрические станции" Донецкого государственного технического университета и в учебном процессе, в частности, в курсовых и дипломных проектах студентов энергетического факультета.

Корректное использование классической теории ПП машин переменного тока, обоснованность принятых допущений и удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными, приведенными в литературе,

подтверждают достоверность научных положений диссертационной работы.

Апробация работы: основные положения диссертационной работы были представлены на VI (Бельгия, 1994 г.) и VII (Польша, 1996 г.) международных симпозиумах по расчетам токов КЗ, на II международной конференции по электромеханике и электротехнологии (Ялта, 1996 г.), на всероссийском научном семинаре "Кибернетика электрических систем" по тематике "Диагностика электрооборудования" (Новочеркасск, 1996 г.), на региональной научной конференции "Творческое наследие В.И. Вернадского и современность" (Донецк 1995г.), VI всеукраинской студенческой научной конференции "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов" (Донецк 1996 г.) и на расширенном заседании кафедры "Электрические станции" (Донецк 1996 г.). Работа выполнялась по плану научно-исследовательских работ Донецкого государственного технического университета.

Публикации: по результатам решенных в работе задач опубликовано в печати 11 научных работ.

Структура и объем работы: диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и 2 приложений. Работа содержит 148 страниц основного текста, 127 рисунков, 9 таблиц. Библиография состоит из 100 наименований источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы исследований, сформулированы цель и идея работы, излагаются решаемые задачи, а также основные результаты и положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе дан анализ существующих методов математического моделирования РСДН. Большой вклад в решение указанной проблемы внесли следующие ученые: Щедрин Н.Н., Сыромятников И.А., Ковач К.П., Веников В.А., Копылов И.П., Соколов Н.И., Сивокобыленко В.Ф., Черновец А.К., Мамедов Ф.А., Кетнер К.К. и Сендюров В.М. Анализ существующих методов математического моделирования РСДН позволил выявить недостатки, к основным из которых относятся: большое количество вычислительных операций, жесткая привязка математической модели к конкретной системе электроснабжения и исследования только симметричных ПП для

конкретного вида нагрузки. На основе сделанного анализа сформулированы постановка вопроса и основные задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены математические модели асинхронного и синхронного двигателей. За основу приняты модели, основанные на полных ДУ Парка-Горева, составленных для многоконтурных схем замещения ротора. Преимущества последних заключаются в том, что они учитывают явление вытеснения тока в роторе; справедливы для расчета как переходных, так и установившихся режимов, а также в том, что параметры многоконтурных схем замещения постоянны и удобны для расчета на ЭВМ.

Рассмотрены математические модели сетевых элементов системы электроснабжения (силовой трансформатор, линия электропередачи, силовой реактор, электрическая дуга в месте КЗ, статическая активно-индуктивная нагрузка и батарея конденсаторов). Сетевые элементы представлены их полными ДУ. Математическая модель трансформатора рассмотрена с учетом группы соединения его обмоток, что позволяет исследовать ПП в РСДН, часть которой относится к сетям с глухозаземленной нейтралью, а другая часть - к сетям с изолированной нейтралью.

В третьей главе разработаны методы автоматического формирования на ЭВМ математической модели РСДН сложных конфигурации, основанные на использовании полных ДУ элементов, а также на использовании уравнений связей для определения определяющих координат (контурные токи или узловые напряжения).

Сущность и способ реализации предложенных методов автоматического формирования на ЭВМ математической модели РСДН заданных структур заключается в следующем: для схемы замещения заданной РСДН получают граф, на котором обозначены узлы, нумерованы ветви и приняты ориентации ветвей. Нумерация ветвей произведена в соответствии с приоритетом типов элементов, который в работе установлен следующим: ветви, содержащие независимые источники напряжения, затем ветви кабельных и воздушных линий электропередачи, реакторы, трансформаторы и, наконец, ветви, замещающие активно-индуктивную нагрузку, статические конденсаторы и двигательную нагрузку.

Формируют векторы токов I_b , напряжений U_b , напряжений на емкостях U_C , ЭДС e_b ветвей, а также диагональные матрицы параметров ветвей: активных сопротивлений R_b , индуктивностей L_b и емкостей ветвей C_b :

$$I_b = (i_1, i_2, \dots, i_p)^{tr},$$

$$U_C = (u_{C1}, u_{C2}, \dots, u_{Cp})^{tr},$$

$$U_b = (u_1, u_2, \dots, u_p)^{tr},$$

$$e_b = (e_1, e_2, \dots, e_p)^{tr},$$

$$R_b = \text{diag}(R_1, R_2, \dots, R_p),$$

$$L_b = \text{diag}(L_1, L_2, \dots, L_p),$$

$$C_b = \text{diag}(C_1, C_2, \dots, C_p),$$

$$J_K = (J_A, J_B, \dots, J_S)^{tr},$$

где

p - общее количество ветвей в схеме;

q - общее количество узлов в схеме $(0, A, B, \dots, S)$;

J_K - вектор-столбец узловых токов, обусловленных междуузловыми источниками токов.

Информацию о структуре заданной РСДН представляют в виде матрицы соединений Π , затем путем элементарных преобразований последнюю приводят к матрице ступенчатого вида, позволяющей определить ветви дерева и хорды. При указанном приоритете хордами будут ветви, содержащие индуктивные и емкостные элементы. Приняв в качестве переменных состояний токи хорд с индуктивностями и напряжения хорд с емкостями, представляется возможным автоматически сформировать необходимую систему ДУ.

В результате реализации на ЭВМ алгоритма нахождения дерева схемы сети из исходной матрицы соединения Π получают матрицу Π_1 (матрица соединения хорд с узлами) и матрицу Π_2 (матрица соединения ветвей дерева с узлами).

В сформированных ранее векторах токов I_b , напряжений U_b , напряжений на емкостях U_C , ЭДС e_b ветвей, а также в диагональных матрицах параметров ветвей: активных сопротивлений R_b , индуктивностей L_b и емкостей ветвей C_b производится изменение очередности расположения элементов в соответствии с их расположением в полученных матрицах Π_1 и Π_2 , т.е. первыми элементами будут хорды, а последующие - ветви дерева.

Используя изложенную выше информацию, последующие преобразования производим в следующем порядке:

1. Вычисляем матрицу преобразования токов B

$$B = \begin{pmatrix} \bar{I} \\ -\Pi_2^{-1} \cdot \Pi_1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

Π_2^{-1} - обратная матрица матрицы Π_2 размером $(q-1) \times (q-1)$;

\bar{I} - диагональная единичная матрица размером $(p-(q-1)) \times (p-(q-1))$.

2. Формируем матрицу контурных индуктивностей L_K

$$L_K = B^T L_b B, \quad (2)$$

где

B^T - транспонированная матрица от исходной матрицы B .

3. Формируем вектор вынуждающих ЭДС ветвей E_b

$$(E_b) = (e_b) - (R_b) \cdot (I_b) - (U_C). \quad (3)$$

4. Вычисляем вектор контурных вынуждающих ЭДС E_K

$$(E_K) = B^T (E_b). \quad (4)$$

5. Формируем систему ДУ для расчета неизвестных (переменных состояния), в качестве которых принимаем токи хорд (токи активно-индуктивных контуров) и напряжения на емкостях

$$\begin{pmatrix} L_K \\ C_b \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} pI_K \\ pU_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_K \\ I_b \end{pmatrix}. \quad (5)$$

6. Решаем систему ДУ (5) одним из численных методов

$$\left. \begin{aligned} pI_K &= L_K^{-1} E_K, \\ pU_C &= C_b^{-1} I_b, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где I_K - подвектор токов хорд (независимых ветвей).

7. Определяем токи и напряжения ветвей I_b

$$I_b = B \cdot I_K - \left(\frac{\bar{0}}{\Pi_2^i} \right) \cdot J_K, \quad (7)$$

$$U_b = E_b - L_b \cdot pI_b, \quad (8)$$

где $\bar{0}$ - нулевая подматрица размером $(q-1) \times (p-(q-1))$; pI_b вычисляем, используя (6) и вычисляя производную от источников узловых токов

$$pI_b = B \cdot pI_K - \left(\frac{\bar{0}}{\Pi_2^i} \right) pJ_K. \quad (9)$$

Следует отметить, что при наличии в узлах электрической схемы двигательной нагрузки, изложенный выше алгоритм предполагает, что электродвигатель представлен ветвью, содержащей эквивалентную ЭДС и сопротивление.

Чтобы удовлетворить этому требованию предлагается использовать способ представления электродвигателей в переходном режиме в виде последовательно соединенных эквивалентной переменной ЭДС, сверхпереходной индуктивности и активного сопротивления статора. Указанная ЭДС определяется на каждом шаге расчета из решения ДУ. В этом случае представляется возможным структурную схему электроснабжения рассматривать совместно со схемами замещения двигателей.

В работе также разработан метод автоматизации формирования математической модели РСДН, основанный на использовании метода узловых напряжений, отличающийся от вышеуказанного тем, что на каждом шаге расчета из решения системы алгебраических уравнений

находят напряжения в узлах схемы сети, затем решают ДУ отдельных элементов.

Исследования ПП в РСДН показали, что при математическом моделировании ряда ПП, РСДН может быть описана жесткими системами ДУ, что затрудняет получение решения. Для решения этой проблемы разработана дискретная математическая модель, основанная на использовании неявных методов интегрирования и позволяющая повысить численную устойчивость расчета при анализе различных режимов работы.

Указанный подход основан на том, что с точки зрения численного интегрирования, дифференциальное уравнение может быть аппроксимировано резистивной схемой, соответствующей методу интегрирования. Определение "дискретные" использовано для того, чтобы подчеркнуть, что параметры модели дискретны, т.е. они изменяются от одного временного шага к другому.

Соответствующая дискретная математическая модель может быть получена, например, при использовании неявного метода Эйлера.

Применив последний к ДУ электродвигателей с двумя контурами на роторе, записанным в матричной форме записи, получим:

$$\frac{L (I_{n+1} - I_n)}{h} = U_{n+1} - R I_{n+1} - \Omega L I_{n+1}, \quad (10)$$

откуда токи

$$I_{n+1} = Y_n (U_{n+1} + \frac{L}{h} I_n), \quad (11)$$

где

$$Y_n = Z_n^{-1} = \left[\frac{L}{h} + R + \Omega L \right]^{-1}; \quad (12)$$

I_{n+1}, I_n - вектор столбец токов обмотки статора и контуров ротора на шаге расчета $n+1$ и n соответственно; U_{n+1} - вектор столбец напряжений обмотки статора и контуров ротора на шаге расчета $n+1$; R - диагональная матрица активных сопротивлений обмотки статора и контуров ротора; L - матрица собственных и взаимных индуктивностей обмотки статора и контуров ротора; Ω - матрица вращения координатных осей; h - шаг расчета.

Аналогичным образом в работе были разработаны дискретные математические модели трансформатора и РСДН в целом.

В работе предложено для каждого исследуемого электродвигателя представить элементы обратной матрицы сопротивления Z_n^{-1} аналитическими выражениями в виде функций, зависящих от частоты вращения ротора $Y_{(i,j)} = f(\omega)$. Это позволяет существенно сократить машинное время при исследовании ПП с использованием дискретных математических моделей.

Четвертая глава посвящена вопросам дальнейшего совершенствования математических моделей для расчета симметричных и несимметричных ПП в РСДН с учетом групп соединения обмоток питающих трансформаторов, режимов включения и отключения коммутационной аппаратуры при возникновении и отключении КЗ, влияния на ПП сопротивления дуги в месте КЗ. Применительно к РСДН (рис.1) с учетом (1)-(9), разработана математическая модель РСДН в фазных координатах, с целью решения практически важных вопросов анализа поведения двигательной нагрузки при различном месте (К1, К2) и виде КЗ. Электрическая дуга в месте КЗ учитывалась как нелинейное сопротивление обратно пропорциональное току, протекающему через нее. При этом приближенно напряжение погасания дуги принималось равное 0,2 номинального напряжения.

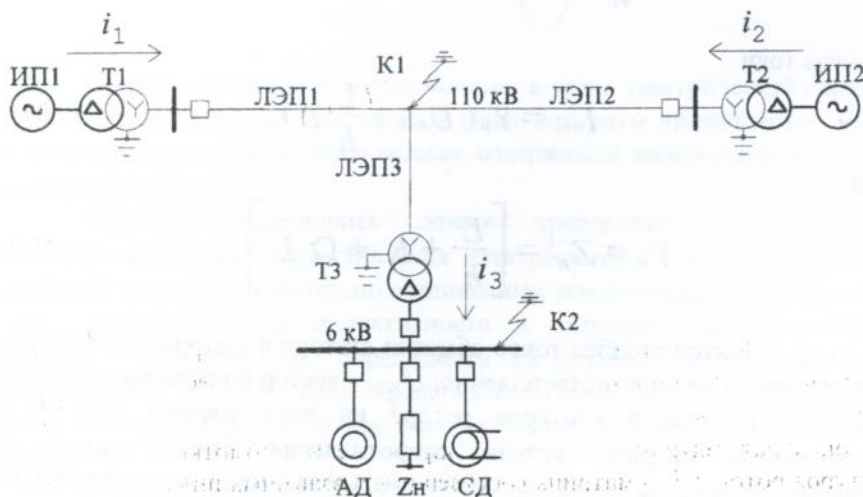


Рисунок 1 - Принципиальная схема РСДН

В работе использован также алгоритм расчета начальных условий переменных состояния из решения алгебраических уравнений для

установившегося режима, благодаря чему сокращается машинное время при анализе ПП. Начальные условия для переменных состояния в режимах отключений присоединений находились на основе закона коммутации, согласно которому алгебраическая сумма потокосцеплений по любому замкнутому контуру до и после коммутации остается неизменной, т.е. сохраняется непрерывность потокосцеплений замкнутых контуров:

$$\sum_{j=1}^q [\bar{\psi}_j^{(+)} - \bar{\psi}_j^{(-)}] = \sum_{j=1}^q \Delta \bar{\psi}_j = 0. \quad (13)$$

На каждом шаге решают ДУ элементов при условии постоянства напряжений в узлах схемы. Напряжения находят по данным предшествующего шага из системы алгебраических уравнений, записанной на основе первого закона Кирхгофа для производных от узловых токов, приведенных предварительно к единой для всех элементов системе координат. Для обладающих симметрией статора и ротора асинхронных машин используют систему координат α, β неподвижную ($\omega_k=0$). Для синхронных машин применяют систему координат d, q , жестко связанную с собственным ротором ($\omega_k=\omega$). При этом в ДУ каждой из машин периодические коэффициенты исчезают, однако появляется необходимость преобразования части переменных состояния машин к общим осям, в качестве которых принимают фазные координаты $(a, b, c, 0)$, что позволяет исследовать как симметричные, так и несимметричные ПП в системе электроснабжения.

В пятой главе приведены результаты исследования ПП в РСДН (рис.1). Установлена закономерность группового выбега и поведения двигательной нагрузки при наличии симметричных и несимметричных видов КЗ в питающей сети.

Как видно, например, из рис.2 в доаварийном режиме потребляемая асинхронным электродвигателем активная мощность имеет постоянную величину, а при возникновении металлического однофазного КЗ в точке К1 она становится знакопеременной (при положительном среднем значении) и имеет частоту пульсаций 100 Гц, что необходимо учитывать при проектировании устройств РЗА с использованием быстродействующих реле направления мощности. После отключения источников питания электродвигатель продолжает подпитывать место КЗ.

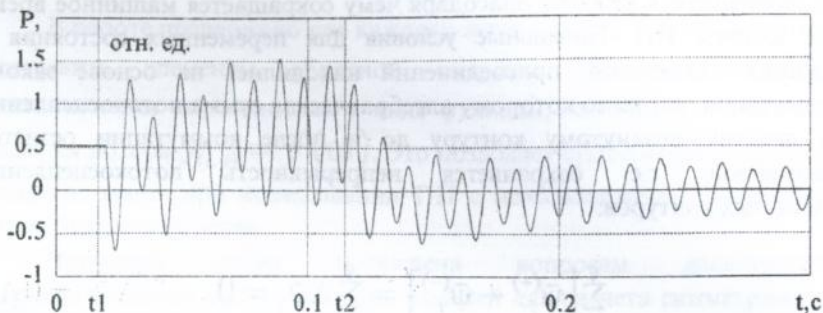


Рисунок 2 - Активная мощность асинхронного электродвигателя при возникновении металлического однофазного КЗ ($t_1=0,02с$) и последующем отключении источников питания ($t_2=0,12с$).

Время подпитки места КЗ существенно зависит от количества электродвигателей, коэффициентов их загрузки, характера нагрузки, вида и удаленности места КЗ и др.

Характер изменения во времени тока, протекающего по нейтрали питающего трансформатора при однофазном КЗ, показан на рис.3. Из последнего видно, что после отключения источников питания электродвигатели продолжают подпитывать место КЗ. Если КЗ происходит через дугу, то ее погасание сразу после отключения источников питания не происходит.

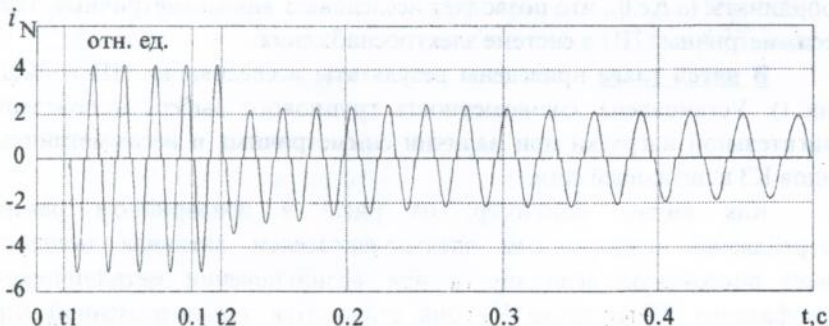


Рисунок 3 - Ток, протекающий по заземленной нейтрали питающего трансформатора при возникновении дугового однофазного КЗ ($t_1=0,02с$) и последующем отключении источников питания ($t_2=0,12с$).

Рекомендована методика учета токов подпитки двигательной нагрузки при расчете параметров срабатывания РЗиА. Как следует из рис.2 время существования тока подпитки места КЗ от двигательной

нагрузки составляет порядка 0,5-1,2 с, что может оказаться больше времени срабатывания АПВ, действие которого в этом случае будет неуспешным.

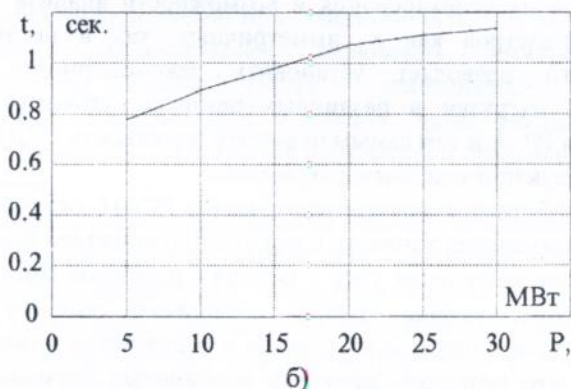
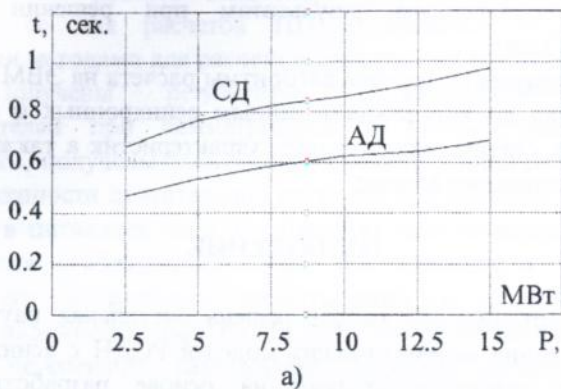


Рисунок 4 - Зависимость времени устойчивого горения дуги после отключения источников питания от суммарной мощности двигательной нагрузки при однофазном дуговом КЗ в точке К1: а) только при асинхронной (АД) или синхронной (СД) нагрузке; б) при асинхронной и синхронной нагрузке.

Проведен анализ режимов успешного и неуспешного самозапуска. Выполнен расчет угла между вектором ЭДС питающей системы и вектором остаточного напряжения на выводах электродвигателей при действии АПВ и АВР. С целью предотвращения противофазного включения электродвигателей, сопровождающегося повышенными значениями токов и электромагнитных динамических моментов даны

рекомендации по определению зон недопустимых углов включения и предельного времени перерыва питания.

В заключении приведен общий итог диссертационной работы и выводы по полученным результатам при решении в работе поставленных задач.

В приложении приведены алгоритмы расчета на ЭВМ параметров схем замещения по каталожным данным асинхронных и синхронных двигателей, их статических пусковых характеристик а также приведена система относительных единиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача совершенствования математических моделей РСДН с асинхронными и синхронными электродвигателями на основе разработки методов автоматизации их формирования и возможности анализа мгновенных значений параметров как в симметричных, так и несимметричных режимах, что позволяет установить закономерности поведения двигательной нагрузки в различных режимах, уточнить параметры срабатывания РЗиА и тем самым повысить надежность РСДН. При этом получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель РСДН, отличающаяся тем, что с целью повышения точности в ней электродвигатели представлены с учетом явления вытеснения тока в роторе с помощью многоконтурных схем замещения, учтены группы соединения обмоток питающих трансформаторов и режимы включения и отключения коммутационной аппаратуры, что позволяет получить мгновенные значения режимных параметров и выполнить анализ ПП в режимах однофазного, двухфазного, двухфазного на землю, трехфазного КЗ, пуска, индивидуального и группового выбега и самозапуска электродвигателей; АПВ и АВР.

2. Разработаны алгоритмы автоматического формирования математических моделей РСДН, основанные на использовании топологической схемы соединения элементов, отличающиеся тем, что выбор переменных состояния (токов индуктивностей и напряжений емкостей) производится на основе построения дерева графа заданной схемы с учетом установленного приоритета разного типа элементов и путем элементарных преобразований матрицы соединения.

3. Разработана дискретная математическая модель системы электроснабжения, описываемой жесткими системами ДУ, основанная

на использовании неявного метода Эйлера и позволяющая повысить численную устойчивость при анализе различных режимов работы. Данная модель по форме представления не отличается от моделей, используемых для расчета стационарных режимов, что позволяет использовать ее для расчетов ПП в сложных РСДН широко применяемыми методами для расчета стационарных режимов.

4. Получены результаты, показывающие поведения электродвигателей при симметричных и несимметричных КЗ в питающей сети, получены зависимости времени подпитки места КЗ от суммарной мощности двигательной нагрузки при наличии однофазного дугового КЗ в питающей сети. С помощью этих зависимостей можно уточнить время срабатывания АПВ, что приводит к уменьшению количества его неуспешных срабатываний и соответственно к повышению надежности работы РСДН. Проведен анализ режимов успешного и неуспешного самозапуска. Выполнен расчет угла между вектором ЭДС питающей системы и вектором остаточного напряжения на выводах электродвигателей при действии АПВ и АВР. С целью предотвращения противофазного включения электродвигателей, сопровождающегося повышенными значениями токов и электромагнитных динамических моментов, даны рекомендации по определению зон недопустимых углов включения и предельного времени перерыва питания.

5. Анализ полученных результатов показал, что после отключения дугового однофазного КЗ в питающей сети электродвигатели в режиме группового выбега продолжают подпитывать место КЗ, и погасание дуги сразу не происходит. Длительность затухания тока подпитки места КЗ от двигательной нагрузки для рассматриваемой в данной работе РСДН составляет порядка 0,5-1,2с, что может оказаться больше времени действия АПВ, которое в этом случае будет неуспешным.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Sivokobylenko V.F., El Jufout Saleh. Analysis of transient in nodes of power system having dynamic load. VI International symposium on short-circuit currents in power system, Belgium, 1994. (№ 1-117.5).

2. Sivokobylenko V.F., El Jufout Saleh. Analysis of behaviour of dynamic load during a short-circuit in the power supply system. VII International symposium on short-circuit currents in power system, Poland, 1996. (№ 1-1.3.1).

3. Сивокобыленко В.Ф., Ел Джуфоут Салех. Дискретная математическая модель асинхронного электродвигателя. Электромеханика и электроэнергетика. Сборник научных трудов энергетического факультета ДонГТУ: Донецк, 1996. с. 4-8.

4. Сивокобыленко В.Ф., Ел Джуфоут Салех. Формирование математической модели системы электроснабжения с двигательной нагрузкой на основе метода узловых напряжений. ДонГТУ: Донецк, 1995. ДР в ГНТБ Украины № 500-Ук 95 - 18 с.

5. Сивокобыленко В.Ф., Ел Джуфоут Салех. Математическое моделирование систем электроснабжения с двигательной нагрузкой. ДонГТУ: Донецк, 1995. ДР в ГНТБ Украины № 341-Ук 95 - 33 с.

6. Сивокобыленко В.Ф., Ел Джуфоут Салех. Автоматизация формирования математических моделей разветвленных систем электроснабжения с двигательной нагрузкой. ДонГТУ: Донецк, 1995. ДР в ГНТБ Украины № 864-Ук 95 - 22 с.

7. Сивокобыленко В.Ф., Ел Джуфоут Салех. Определение тока статора асинхронных двигателей при переключениях питания. Известия вузов энергетика. Минск, № 3, 1996. (в печати).

8. Сивокобыленко В.Ф., Нури Абдельбассет, Ел Джуфоут Салех. Анализ поведения двигательной нагрузки при коротких замыканиях в системе электроснабжения. Тез. докл. II международной конференции по электромеханике и электротехнологии, Ялта 1996.

9. Сивокобыленко В.Ф., Ел Джуфоут Салех, Нури Абдельбассет. Дискретная математическая модель многомашинной электрической системы для анализа переходных процессов. Известия вузов электромеханика. НГТУ: Новочеркасск, 1996. (в печати).

10. Ел Джуфоут Салех. Анализ переходных процессов в узлах энергосистем с двигательной нагрузкой. Тез. докл. региональной науч. конф. "Творч. наследие В.И. Вернадского и современность". Донецк: ДонГТУ, 1995. - с 15.

11. Ел Джуфоут Салех Абдель-Хамид. Математическое моделирование режимов работы автономных систем с ветроэлектростанциями. VI Всеукраинская студенческая научная конференция "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов". Донецк - 1996. с. 151-152.

Личный вклад автора диссертационной работы в работах, написанных в соавторстве, заключается в следующем: участие в разработке математических моделей в работах [1-3]; разработка программ для ЭВМ и исследование ПП в РСДН в работах [1,2,7]; участие

в разработке алгоритмов и программ расчета на ЭВМ автоматического формирования математических моделей РСДН в работах [4-6]; анализ поведения электродвигателей в узлах энергосистем в работах [8,9]; анализ поведения асинхронного электродвигателя при переключениях питания в работе [7].

АНОТАЦІЯ

Ел Джуфут Салх Абдель-Хамід Халаф. Математичне моделювання перехідних процесів у вузлах енергосистем з електричними двигунами.

Робота є рукописом на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи, включаючи їх управління та регулювання" та спеціальністю 05.14.02 "Електричні станції (електрична частина), мережі, електроенергетичні системи та управління ними". Донецький державний технічний університет. Донецьк, 1996.

В дисертації розроблені методи автоматичного формування математичних моделей систем електропостачання з електричними двигунами. Здійснено аналіз перехідних процесів у таких системах і розроблені рекомендації по підвищенню надійності їх роботи.

ANNOTATION

El-Jufout Saleh Abdel-Hamid Khalaf. Mathematical modeling of transients in units of power system with a dynamic load.

The dissertation is presented for the Ph. D. degree in the speciality 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems, including their control and regulations" and the speciality 05.14.02 "Electrical stations (electrical part), networks, electrical power systems and their control". Donetsk state technical university, Donetsk, 1996.

In the dissertation methods of automatic formation of mathematical models of power supply systems with a dynamic load are developed. Analysis of transients in such systems and recommendations with the purpose of increase of reliability of their work are developed.

Ключові слова:

Методи автоматичного синтезу, математичні моделі, системи електропостачання, синхронні двигуни, асинхронні двигуни, перехідні процеси, рекомендації по підвищенню надійності.

А. Джуфут

13/10/96

AB 36.358