

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

ДЕРКАЧЁВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ НА
РЕЗЕРВНОЕ ПИТАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки).

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2019

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» г. Донецк

Научный руководитель:

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в __ час. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДонНУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп.1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovets@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук

Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Системы электроснабжения с синхронными и асинхронными электродвигателями большой мощности получили широкое распространение на промышленных предприятиях с непрерывным технологическим процессом. К этим системам предъявляются особые требования по обеспечению устойчивой работы при кратковременных нарушениях электроснабжения, что обусловлено необходимостью предотвращения нарушения технологического процесса. В современных системах эта проблема решается за счёт применения быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР). Однако подача резервного питания на электродвигатели может привести к возникновению недопустимых уровней токов и моментов в двигателях. Так, например, в случае несинхронной подачи резервного питания ток в обмотках статоров двигателей превышает номинальные токи в 15–20 раз, что эквивалентно по своему воздействию на изоляцию нескольким тысячам пусков двигателя, а электромагнитный момент, превышающий номинальные значения в 10–15 раз, являются недопустимыми для ряда механизмов которые не допускают в режиме своей работы значительных ускорений. Поэтому подача резервного питания в таких системах электроснабжения должна осуществляться с контролем угла между напряжениями секций основного и резервного источников питания. Таким образом, реализация этого условия и разработка алгоритмов работы пусковых устройств, выявляющих нарушения электроснабжения во внешней сети электроснабжения, требуют обоснования структуры и параметров устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки.

В связи с этим совершенствование методов и устройств системы автоматического переключения питания на резервный источник электроснабжения потребителей с электродвигательной нагрузкой и непрерывным технологическим процессом является **актуальной** научно-прикладной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам поведения электродвигателей в режимах работы устройств автоматического включения резервного питания посвящено большое количество трудов. Так в работах М. И. Слодаржа, И. А. Сыромятникова и С. И. Гамазина исследованы режимы поведения двигателей при потере питания и действии устройств автоматического включения резерва (АВР). В работах М. А. Шабада, А. В.

Беляева, Б. Н. Барзама, отражены исследования в области особенностей выполнения устройств АВР для подстанций с электродвигателями. Работы Д. Т. Гумирова, В. А. Жукова, и В. Ф. Сивокобыленко посвящены вопросам повышения эффективности работы устройств БАВР. Однако не решенным остается вопрос обоснования структуры и параметров устройства автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки.

Цель и задачи исследований. Цель работы состоит в обосновании способов модификации устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки путем устранения ресурсоснижающего фактора динамической перегрузки технологических электромеханических устройств.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Аналитический обзор исследований в области управления динамическими режимами электромеханических устройств при управлении параметрами их электропитания и обоснование направления научных исследований.

2. Разработка математической модели системы электроснабжения многомашинного электромеханического комплекса, содержащего асинхронные и синхронные двигатели средней и большой мощности, адаптированной к анализу переходных процессов, обусловленных кратковременными нарушениями электроснабжения потребителей и позволяющей учитывать взаимное влияние энергетических потоков, генерируемых электрическими машинами.

3. Обоснование предельных электромеханических параметров объекта управления и критериев реализации управляющих воздействий применительно к процессу переключения на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения.

4. Математическое моделирование и анализ режимов работы многомашинного электромеханического комплекса с асинхронными и синхронными электродвигателями при использовании различных вариантов реализации устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАРВ).

5. Обоснование приемлемого принципа функционирования пускового органа БАВР и его техническая реализация.

6. Экспериментальные исследования процесса автоматического включения резерва электроснабжения технологических установок,

обоснованного методами математического моделирования, анализ и обобщение экспериментальных данных и установление адекватности теоретических исследований результатам эксперимента.

7. Техническая реализация и внедрение результатов диссертационных исследований.

Объект исследования. Процессы в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой в режимах быстрых автоматических переключений питания с рабочего на резервное при возникновении аварийных ситуаций.

Предмет исследования. Предметом исследования являются принципы построения и алгоритмы работы устройств автоматического переключения питания двигательной нагрузки в системах электроснабжения.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые разработан способ определения в темпе реального процесса параметров аналитической зависимости от времени угла сдвига фаз между напряжениями секций при нарушениях электроснабжения, что позволяет обеспечить синфазное подключение резервного питания с помощью разработанного устройства БАВР.

2. Получила дальнейшее развитие математическая модель для анализа переходных процессов в системах электроснабжения с синхронными и асинхронными электродвигателями, основанная на полных дифференциальных уравнениях всех элементов сети, которая отличается учетом эффекта вытеснения токов в роторных контурах двигателей, способом учета взаимного влияния двигателей в переходных режимах и возможностью учета различных принципов построения пусковых и логических органов устройств быстродействующего АВР.

3. Впервые для определения ортогональных составляющих измеряемых сигналов от трансформаторов тока (напряжения) предложен метод эквивалентных синусоид, в котором с целью повышения быстродействия на скользящем интервале наблюдения длительностью менее полупериода промышленной частоты находят амплитуду и фазу эквивалентной синусоиды путем интегрального усреднения заданного количества мгновенных дискретных значений измеряемых сигналов и их производных.

4. Обоснован принцип совершенствования пускового органа направления мощности, предусматривающий определение угла сдвига фаз между током и опорным напряжением в каждом цикле измерений, в котором вместо опорного суммарного напряжения рабочего и резервного источников питания в текущем цикле измерений, используется напряжение рабочего источника из

добавленного органа памяти доаварийного цикла измерений, что позволяет обеспечить успешную работу БАВР при близких коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в раскрытии закономерностей протекания переходных процессов в двигательной нагрузке при нарушениях нормального режима электроснабжения, и их использовании для совершенствования методов, алгоритмов и устройств системы автоматического переключения на резервное питание двигательной нагрузки.

Практическое значение результатов исследований.

1. Разработаны математические модели многомашинных систем с двигательной нагрузкой, пригодные к исследованию сложных многомашинных электромеханических систем в динамических режимах их электроснабжения.

2. Определены условия, исключающие несинхронную подачу резервного напряжения на двигатели от резервного источника питания в процессе автоматического включения резерва.

3. Разработаны алгоритмы работы и создано микропроцессорное устройство БАВР, адаптированное к широкому спектру структур многомашинных электромеханических комплексов.

4. Приведены рекомендации по применению быстродействующих устройств АВР в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач использовались законы электротехники и методы решения систем дифференциальных и алгебраических уравнений, теория электрических машин и релейной защиты электрических систем. Теоретические исследования в работе проводились с помощью методов математического моделирования, а практические с использованием методов физического эксперимента.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснованы математические модели многомашинных систем электроснабжения с двигательной нагрузкой для анализа переходных процессов, полученные на их базе закономерности протекания переходных процессов позволяют установить поведение асинхронных и синхронных двигателей в режимах аварийной потери рабочего питания и переключения на резервный источник питания.

2. Разработаны способы включения резервного питания, в которых осуществляется учёт времени работы выключателей и контроль угла рассогласования между векторами напряжений основного и резервного

источников питания, что позволяет обеспечить успешный самозапуск двигателей и снизить уровни токов до допустимых значений при потере питания от основного источника.

3. Новые принципы построения микропроцессорных устройств БАВР на основе разработанного метода эквивалентных синусоид, позволяющего определить ортогональные составляющие измеряемых токов и напряжений, что обеспечивает повышение быстродействия, а также метод реализации органа контроля направления мощности, дополненный функцией памяти дискретных измерений напряжения, что обеспечивает функциональность устройства БАВР при глубоких посадках напряжения.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами математического моделирования и лабораторными испытаниями опытного образца микропроцессорного устройства БАВР.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в частности: п.3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП)»; п.4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация»; п. 6 «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления».

Основные положения диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях: VI Международная научно-техническая конференция «Управление режимами работы объектов электрических и электромеханических систем – 2013 (КРЕС –2013)», г. Донецк, 2013 г., XVI Международная научно-техническая конференция «Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, образование и практика» г. Кременчуг, 2015 г., III Международная научно-техническая конференция «Оптимальное управление электроустановками ОКУ'15», г. Винница, 2015 г., Международная научно-техническая конференция «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное

моделирование 2019», г. Донецк, 2019г., IV международная научно-практическая конференция «Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем», г. Донецк, 2019 г.

Личный вклад автора. Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований, разработке испытательного стенда и опытного образца.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 15 работах, в том числе 1 из них в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР, 2 – в рецензируемых научных журналах и изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук в Российской Федерации, 7 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины, 2 – в материалах и тезисах конференций, 2 патента на полезную модель, 1 монография.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 105 наименований. Работа изложена на 220 страницах, на которых приведены 20 таблиц, 94 рисунка, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе «Обеспечение бесперебойности электроснабжения производств с непрерывным технологическим циклом: анализ проблемных вопросов и методов их решения» проанализированы особенности построения схем электроснабжения промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом с синхронными и асинхронными электродвигателями большой единичной мощности и пути повышения надежности их электропитания. Проанализированы критически существующие методы расчёта переходных процессов в схемах электропитания и указаны их преимущества и недостатки. Выполнен обзор и анализ существующих устройств автоматического включения резерва (АВР) выполненных, как на электромеханической, так и на микропроцессорной элементной базе. Указаны достоинства и недостатки пусковых органов рассмотренных устройств АВР. На основании выявленных нерешённых задач на теоретическом и практическом уровне возникает проблема с совершенствованием методов и устройств

автоматического переключения на резервное питание электродвигателей, что позволило сформулировать цель и задачи исследования.

Во втором разделе приведены методики расчёта параметров эквивалентных схем замещения асинхронных электродвигателей, явнополусных и неявнополусных синхронных электродвигателей, трансформаторов. Математические модели электродвигателей представлены системами дифференциальных уравнений, записанными в матричной форме, в которых токи статоров представлены в трехфазной системе координат, а токи роторов в двухфазной с учетом зависимости потокоцеплений и индуктивностей электродвигателей от угла положения ротора. Синхронные и асинхронные электродвигатели описываются системой дифференциальных уравнений (1) с тем отличием, что для асинхронного двигателя вектор напряжений обмоток ротора равен нулю.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} pI_S \\ pI_R \end{bmatrix} &= L(\gamma)^{-1} \cdot \left[\begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} - \omega \cdot \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} \right]; \\ p\omega &= \frac{1}{T_j} \left[M_{ep}(i, \psi) - M_c(\omega) \right]; \\ p\gamma &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

где: $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, I_S и I_R – векторы токов статора и ротора соответственно, $L(\gamma)$ – матрица индуктивностей, статора и ротора, U_S и U_R – векторы напряжений обмоток статора и ротора, R_S и R_R – матрицы активных сопротивлений статора и ротора соответственно, ω – скорость вращения ротора, $\frac{dL(\gamma)}{d\gamma}$ – матрица производных от индуктивностей статора и ротора, γ – угол положения ротора.

Для учета зависимости потокоцеплений и индуктивностей двигателей от угла положения ротора γ матрицу индуктивностей между фазными обмотками статора и ротора двигателя $L(\gamma)$ представляется в виде четырех подматриц: статор-статор L_{S-S} , статор-ротор $L_{S-R}(\gamma)$, ротор-ротор L_{R-R} , ротор-статор $L_{R-S}(\gamma)$. Указанная матрица имеет вид:

$$L(\gamma) = \begin{bmatrix} L_{S-S} & L_{S-R}(\gamma) \\ L_{R-S}(\gamma) & L_{R-R} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Полученные системы дифференциальных уравнений асинхронного и синхронного электродвигателей позволяют учитывать эффект вытеснения тока в роторе, а использование трехфазной системы координат позволяет выполнять моделирование как симметричных так и несимметричных режимов работы электродвигателей.

В третьем разделе описан принцип формирования математической модели многомашинной системы электроснабжения, все элементы которой представляются в виде эквивалентной противо-ЭДС и сопротивлений в переходном режиме (Рисунок 1) и описываются системой дифференциальных уравнений:

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U - R \cdot I - \xi, \quad (3)$$

где: R , L , I , U , ξ – соответственно матрицы активных сопротивлений фаз, фазных и межфазных индуктивностей, векторы фазных токов, узловых напряжений, противо-ЭДС.

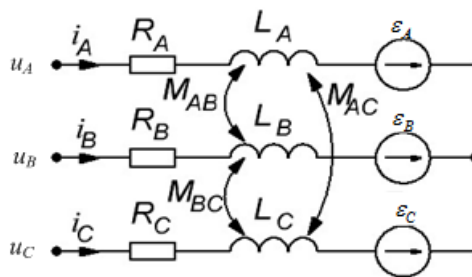


Рисунок 1 – Универсальная схема замещения активно-индуктивной нагрузки

Приведен разработанный метод определения ортогональных составляющих измеряемых сигналов тока (напряжения), в котором для повышения быстродействия, амплитуду и фазу эквивалентной синусоиды находят путем интегрального усреднения мгновенных дискретных значений измеряемых сигналов и их производных.

Представлен усовершенствованный пусковой орган направления мощности, в котором определяют угол сдвига фаз между током и опорным напряжением прямой последовательности, при этом в качестве опорного напряжения используют напряжение на питающих шинах в предыдущем цикле измерений, что позволяет обеспечить успешную работу устройства БАПР при близких коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.

Приведен разработанный способ синфазной подачи резервного питания, в котором в темпе реального процесса определяют параметры аналитической зависимости от времени угла сдвига фаз между напряжениями секций путем фиксации времен достижения углом сдвига фаз трех заданных значений для параболической аппроксимация временной зависимости угла, с помощью которой прогнозируется время совпадения по фазе контролируемых напряжений, что позволяет выполнить синфазную подачу резервного напряжения с учётом времени работы выключателя.

В четвертом разделе приведен анализ переходных процессов и обобщены результаты режимов работы БАВР в системах электроснабжения с крупными асинхронными и синхронными электродвигателями при коротких замыканиях и нарушениях электроснабжения в питающей сети.

Поскольку значения токов и моментов зависят от угла между напряжениями секций основного и резервного источников питания, то с помощью математической модели были выполнены расчёты начальных мгновенных значений токов и моментов двигателей в опытах включения резервного питания при различных углах рассогласования от 0 до 360 градусов. Результаты расчетов обобщены и приведены на рисунке 2.

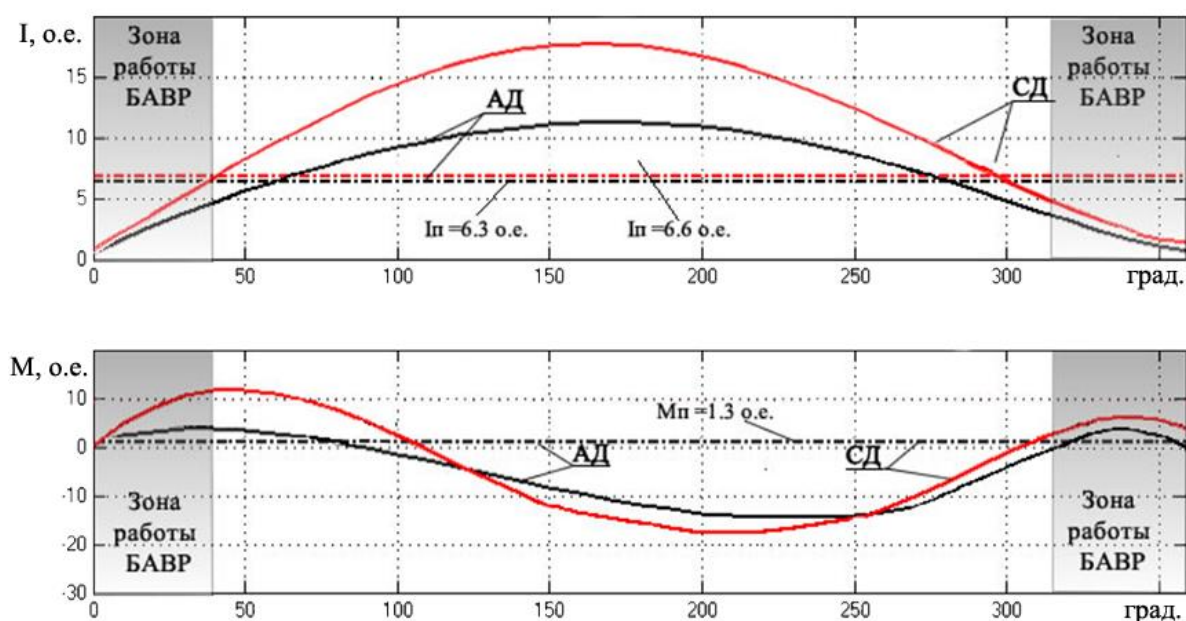


Рисунок 2 – Графики зависимостей токов и электромагнитных моментов электродвигателей от угла включения резервного источника питания

Из рисунка 2 следует, что наибольшие значения токов в двигателях возникают при повторных включениях с углом 180° , а моментов при 210° . При этом допустимые значения углов включения для асинхронного двигателя находятся в зоне углов от 0° до 60° и от 320° до 360° , а для синхронного двигателя от 0° до 40° и от 320° до 360° . Из этих данных следует, что при использовании современных быстродействующих выключателей может рассматриваться вариант включения резервного источника питания при углах до 40° , что существенно облегчает условия самозапуска электродвигателей.

Для участка сети, показанного на рисунке 3, выполнено математическое моделирование работы усовершенствованного алгоритма работы устройства БАВР.

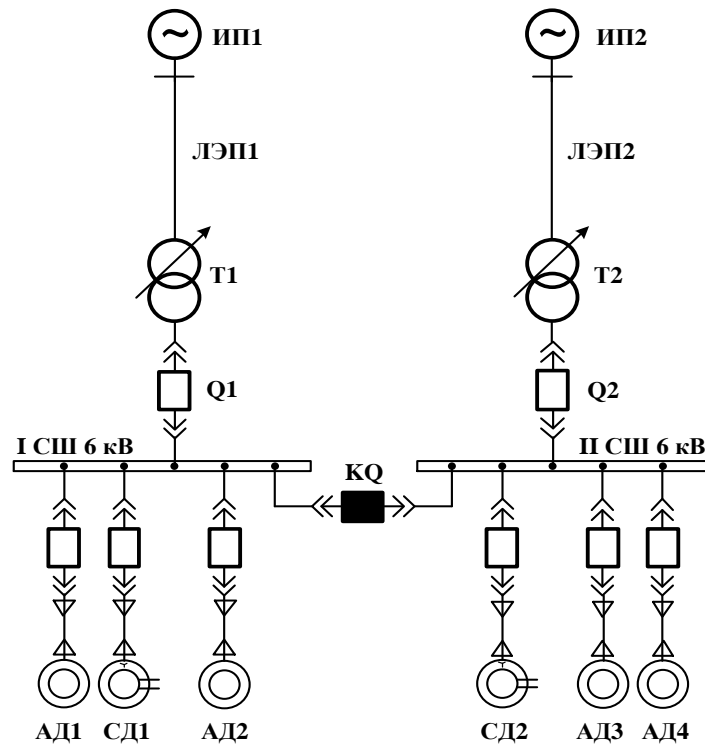


Рисунок 3 – Схема участка сети

В качестве аварийных режимов рассмотрены короткие замыкания во внешней сети электроснабжения, а результаты моделирования работы усовершенствованного алгоритма БАПР приведены в таблице 2 и таблице 3. В качестве коммутационных аппаратов были приняты быстродействующие вакуумные выключатели с временем включения 0.022 мс.

Таблица 2 – Результаты моделирования работы усовершенствованного алгоритма БАПР при внешних коротких замыканиях

Двигатель	Время перерыва питания, с	Кратность тока самозапуска, о.е	Угол включения, град
Внешнее трехфазное короткое замыкание			
АД1	0,047	3,74	38
АД2		2,69	
СД1		4,29	
Внешнее двухфазное короткое замыкание			
АД1	0,046	3,4	33
АД2		2,5	
СД1		3,9	
Внешнее однофазное короткое замыкание			
АД1	0,054	3,2	31
АД2		2,4	
СД1		3,9	

Таблица 3 – Результаты моделирования переключения на резервный источник питания

Двигатель	Быстрое переключение			Синхронное переключение		
	Угол включения, град	Кратность тока самозапуска, о.е.	Длительность перерыва питания, с	Угол включения, град	Кратность тока самозапуска, о.е.	Длительность перерыва питания, с
АД1	29	3,2	0,053	5	2,4	0,33
АД2		2,3			2,6	
СД1		3,9			3,2	

Результаты моделирования, приведенные в таблице 2 и таблице 3 показывают, что усовершенствованный алгоритм работы БАВР обладает высоким быстродействием, так как перерыв питания при возникновении аварийных режимов во внешней сети электроснабжения составляет от 0.047 до 0.33 с, в зависимости от причины потери питания. Максимальный угол включения резервного источника питания не превышает 38° , а кратность токов самозапуска не превышает уровня пусковых токов.

В пятом разделе разработано усовершенствованное микропроцессорное устройство БАВР для электрических систем с двигательной нагрузкой и приведены результаты его экспериментальных исследований. Структурная схема усовершенствованного микропроцессорного устройства БАВР приведена на рисунке 4.

В структуру усовершенствованного устройства БАВР входят блоки формирования комплексов входных сигналов, пороговые органа тока и напряжения, два блока направленного реле, а также блок определения косинуса угла между векторами напряжений основной и резервной секции, сигналы от которых поступают в блок логической обработки сигналов.

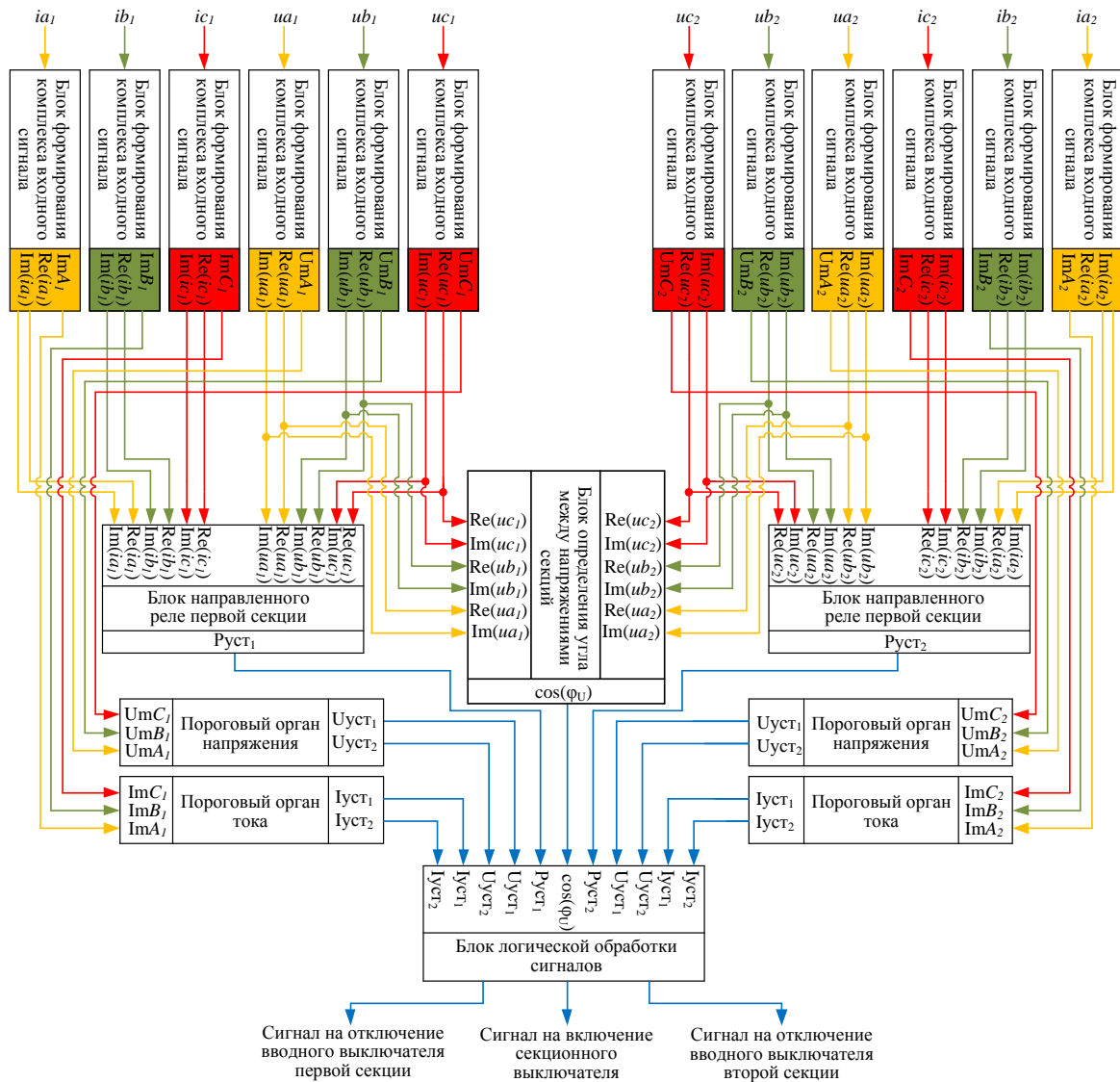


Рисунок 4 – Структурная схема усовершенствованного устройства БАВР

Усовершенствованное микропроцессорное устройство БАВР в режиме реального времени измеряет токи на вводе основной и резервной секций, а также напряжения на них. Сигналы от блоков формирования комплексов измеряемых сигналов поступают в блоки направленного реле, в блок определения косинуса угла между векторами напряжений секций основного и резервного источников питания, а также в блоки пороговых органов.

В блоках направленного реле в режиме реального времени определяется направление мощности прямой последовательности на вводе каждой секции на основе комплексных составляющих тока и напряжения прямой последовательности. Сигналы от всех блоков поступают в блок логической обработки, структурная схема, которого показана на рисунке 5.

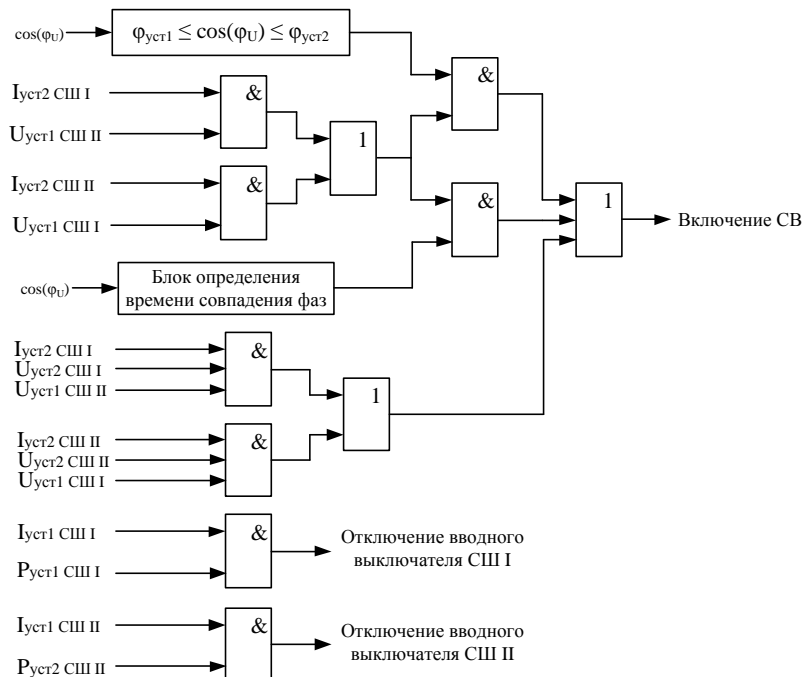


Рисунок 5 – Структурная схема блока логической обработки сигналов

При возникновении короткого замыкания во внешней сети электроснабжения первой секции шин срабатывает направленное реле, и на вход логического блока «И» поступает сигнал $P_{уст1 \text{ СШ I}}$, который равен единице, одновременно с ним от порогового органа тока первой секции шин на вход того же логического блока «И» поступает сигнал $I_{уст1 \text{ СШ I}}$ значение которого также равно единице, поскольку величина тока на вводе секции больше установленной уставки. В результате работы блока логической обработки «И» формируется сигнал, который дает команду на отключение вводного выключателя первой секции. Аналогичным образом в другом логическом блоке «И» происходит обработка сигналов $P_{уст2 \text{ СШ II}}$ и $I_{уст2 \text{ СШ II}}$.

Работа алгоритма быстрого переключения заключается в следующем. Блок логической обработки входных сигналов постоянно контролирует величину косинуса угла между векторами напряжений основного и резервного источников питания и в случае если угол начинает меняться и находится в пределах, допускающих быстрое переключение, на выходе блока контроля величины угла появляется сигнал, равный единице, который поступает в логический блок «И». В этот же логический блок «И» поступает сигнал от работы логического блока «ИЛИ». Аналогичным образом организована работа алгоритма быстрого переключения при потере питания второй секцией шин с тем отличием, что в логический блок «ИЛИ» поступает сигнал от другого логического блока «И», который обрабатывает сигналы

от порогового органа тока второй секции и порогового органа напряжения первой секции.

При работе алгоритма синфазного переключения определение секции, потерявшей питание, и наличие необходимого уровня напряжения на резервной секции шин для переключения питания осуществляется также как и при работе алгоритма быстрого переключения питания. Помимо контроля косинуса угла между векторами напряжений основной и резервной секций данный алгоритм при изменении косинуса угла определяет момент совпадения по фазе остаточного напряжения на секции, потерявшей питание, и напряжения резервной секции питания. Определение момента совпадения напряжений по фазе и корректировка времени подачи команды на включение секционного выключателя с учетом его времени включения осуществляется в блоке определения момента совпадения фаз.

В таблице 4 показаны результаты экспериментальных исследований опытного образца микропроцессорного устройства БАВР в режимах нарушения нормального режима электроснабжения.

Таблица 4 – Результаты экспериментальных исследований.

Причина потери питания	Трехфазное КЗ и «быстрое» переключение на резервный источник	Двухфазное КЗ и «быстрое» переключение на резервный источник	Трехфазное КЗ и «синфазное» переключение на резервный источник	Двухфазное КЗ и «синфазное» переключение на резервный источник	Быстрое переключение на резервный источник при потере питания	Синфазное переключение на резервный источник при потере питания
Время переключения, с	0.138	0.06	0.444	0.609	0.017	0.383
Угол включения, град	40	39	342	345	35	350

Приведенные результаты экспериментальных исследований (Таблица 4) на экспериментальном стенде показывают, что разработанное устройство БАВР осуществляет подачу резервного питания на секцию, потерявшую питание по причине внешних коротких замыканий или отключения вводного выключателя (по причинам не связанным с короткими замыканиями), с минимально возможным временем перерыва питания и контролем угла рассогласования между напряжениями основного и резервного источников питания, что позволяет обеспечить допустимый уровень токов и электромагнитных

моментов электродвигателей в режимах самозапуска, не превышающий уровень пусковых значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи совершенствования методов и устройств автоматического переключения на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения, позволяющее обеспечить бесперебойное электроснабжения ответственных узлов предприятий с непрерывным технологическим процессом.

По результатам диссертационной работы сформулированы следующие выводы:

1. Для асинхронных и синхронных электродвигателей обоснованы методы определения параметров многоконтурных схем замещения на основе каталожных данных, в которых учитывается влияния скин-эффекта на параметры роторных цепей.

2. Разработана математическая модель многомашинного электромеханического комплекса, адаптированная к исследованию процессов при автоматическом включении резерва электроснабжения. Основу модели составляют дифференциальные уравнения, записанные в фазных координатах для всех элементов системы, что в отличие от известных моделей позволяет учитывать пофазную несимметрию параметров.

3. Разработан метод определения ортогональных составляющих измеряемых сигналов тока (напряжения), в котором для повышения быстродействия, амплитуду и фазу эквивалентной синусоиды находят путем интегрального усреднения мгновенных дискретных значений измеряемых сигналов и их производных, что обеспечивает повышение быстродействия.

4. Усовершенствована модель и структура пускового органа направления мощности, в котором определяют угол сдвига фаз между током и опорным напряжением прямой последовательности, при этом в качестве опорного напряжения используют напряжение на питающих шинах в предыдущем цикле измерений, что позволяет обеспечить успешную работу устройства БАПР при близких коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.

5. Разработан способ синфазной подачи резервного питания, основанный на контроле мгновенных значений напряжений на двигателях и на резервном источнике питания, определении угла сдвига фаз между ними и

фиксации времен достижения углом сдвига фаз трех заданных значений для параболической аппроксимация временной зависимости угла, с помощью которой прогнозируется время совпадения по фазе контролируемых напряжений.

6. Обоснована и разработана структура устройства быстродействующего автоматического включения резерва электроснабжения многомашинного электромеханического комплекса, отличающееся реализацией алгоритма синфазного переключения на резервный источник питания и использовании функции определения направления мощности. Экспериментально подтверждена работоспособность разработанного технического решения.

7. Анализ полученных экспериментальных данных в полной мере подтверждает результаты теоретических исследований (на математической модели), направленных на обеспечение бесперебойного электроснабжения электродвигателей многомашинных систем электромеханических комплексов, выполненных в работе.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки ДНР:

1. Сивокобыленко, В.Ф. Автоматизированная система переключения электропитания двигательной нагрузки на резервный источник / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** // Информатика и кибернетика. – 2019. – № 1(15). – С. 13-20.

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Российской Федерации:

2. Сивокобыленко, В.Ф. Анализ переходных процессов в двигательной нагрузке при нарушениях электроснабжения / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. –2016. – № 5. – С. 69-74.

3. Сивокобыленко, В.Ф. Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко, **С.В. Деркачёв** // Электричество. –2014. – №10. – С.38 – 44.

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Украины:

4. Сивокобыленко, В.Ф. Разработка микропроцессорного устройства для подачи резервного питания при нарушениях электроснабжения ответственных

потребителей / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** // Электромеханические и энергосберегающие системы. Ежеквартальный научно-производственный журнал. – 2016. – №1(33). – С. 97-103.

5. Сивокобыленко, В.Ф. Способ повышения надежности электроснабжения в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** // Вестник Винницкого политехнического института. – 2016. – №2. – С. 84-88.

6. Сивокобыленко, В.Ф. Особенности измерительных органов цифровых устройств быстродействующего автоматического включения резерва для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** // Электромеханические и энергосберегающие системы. Ежеквартальный научно-производственный журнал. – 2015. – № 3(31). – С. 126-133.

7. Сивокобыленко, В.Ф. Метод эквивалентных синусоид для цифровых измерительных органов релейной защиты / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** // Научные труды ДонНТУ. Серия «Вычислительная техника и автоматизация». – 2015. – № 1(28), 2015. – С. 215-221.

8. Сивокобыленко, В.Ф. Совершенствование пусковых органов БАВР в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** // Электротехника и электроэнергетика. – 2014. – №1. – С. 61-67.

9. Сивокобыленко, В.Ф. Математическая модель многомашинной системы для анализа поведения электродвигателей в режимах БАВР / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** // Научные труды ДонНТУ. Серия «Электротехника и энергетика». – 2014. – №1(16). – С. 171-178.

10. Сивокобыленко, В.Ф. Микропроцессорное быстродействующее АВР для систем электроснабжения с асинхронными двигателями / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачев** // Научные труды ДонНТУ. Серия «Электротехника и энергетика». – 2013. – №2(15). – С. 224-229.

- в других изданиях:

11. Сивокобыленко, В.Ф. Определение параметров эквивалентных схем замещения и характеристик взрывозащищенных асинхронных двигателей / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко, **С.В. Деркачёв** // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. Тр. ГУ «НИИВЭ». – 2016. – №1. – С. 93-102.

12. Сивокобыленко, В.Ф. Особенности измерительных органов цифровых устройств быстродействующего автоматического включения резерва для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв** //XVI Международная научно-техническая конференция

«Проблемы энергоресурсосбережения в электрических системах. Наука, образование и практика». – 2015. – № 1(13). – С. 214-216.

- патенты:

13. Патент на полезную модель №91756 Украина МПК8 H02J 9/00. Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей: патент на полезную модель / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв.**, заявка u201402257; опубл. 10.07.2014.

14. Патент на полезную модель №80430 Украина МПК8 H02J 9/00. Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей: патент на полезную модель / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв.**, заявка u201214451; опубл. 27.05.2013.

- монографии:

15. В.Ф. Сивокобыленко Асинхронные и синхронные электродвигатели в переходных режимах. Быстродействующее АВР в системах электроснабжения с асинхронными и синхронными двигателями / В.Ф. Сивокобыленко, **С.В. Деркачёв.** – Palmarium academic publishing, 2017. – 107 с.

Личный вклад автора в публикациях: [1] – выполнено математическое моделирование и проведены лабораторные испытания опытного образца устройства БАВР; [2] – проведено моделирование переходных процессов в двигательной нагрузке, даны рекомендации относительно подачи резервного питания; [3, 12] – выполнен расчёт параметров эквивалентных схем замещения асинхронных двигателей и построены их характеристик; [4] – проведены лабораторные испытания опытного образца устройства БАВР; [5] – выполнено математическое моделирование работы микропроцессорного устройства БАВР; [6-8, 11] – разработка алгоритмов работы измерительных органов и их исследование на математических моделях; [9] – построение математической модели и исследование работы микропроцессорных устройств БАВР; [10] – предложен алгоритм работы микропроцессорного устройства БАВР.

АННОТАЦИЯ

Деркачёв С.В. Совершенствование методов и устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) – ГОУВПО

«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
Донецк, 2019.

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи совершенствования методов и устройств автоматического переключения на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения, позволяющее повысить надежность электроснабжения предприятий с непрерывным технологическим процессом.

Предложен метод определения ортогональных составляющих измеряемых сигналов от трансформаторов тока (напряжения) на скользящем интервале наблюдения длительностью менее полупериода промышленной частоты.

Получен способ определения параметров аналитической зависимости угла сдвига фаз между напряжениями взаиморезервируемых секций от времени, что позволяет выполнить синфазную подачу резервного питания.

Усовершенствован пусковой орган направления мощности для устройств БАВР, в котором определяют угол сдвига фаз между током прямой последовательности и напряжением прямой последовательности рабочего источника из органа памяти доаварийного цикла измерений.

Усовершенствована математическая модель для анализа переходных процессов в системах электроснабжения с синхронными и асинхронными электродвигателями, основанная на полных дифференциальных уравнениях всех элементов сети.

Ключевые слова: автоматическое переключение, резервное питания, надежность электроснабжения, математическая модель, двигательная нагрузка, ток самозапуска, микропроцессорное устройство.

ABSTRACT

Derkachev S.V. Improving of the methods and devices for automatic control of switching to the backup power supply of the motor load in power supply systems.

Ph.D. (Candidate's) Thesis in Engineering Science by specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry) (engineering science)". DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY, Donetsk, 2019.

Scientific and practical task of improving the methods and devices for automatic switching to backup power of the motor load in power supply systems is considered in the thesis.

A method for determining the orthogonal components of the measured signals from current (voltage) transformers on a sliding observation interval with duration less than half period of industrial frequency is proposed.

A method has been obtained for determining the parameters of the analytical dependence of the phase angle between the voltages of the mutually reserved sections on time, which makes it possible to perform an in-phase supply of backup power.

The starting direction of the power direction has been improved, in which the phase angle between the direct sequence current and the direct sequence voltage from the memory organ of the pre-emergency measurement cycle is determined.

The mathematical model for the analysis of transients in power supply systems with synchronous and asynchronous electric motors, based on the full differential equations of all network elements, has been improved.

Keywords: automatic switching, backup power, reliability of power supply, mathematical model, motor load, self-starting current, microprocessor device.