

На правах рукописи



Чижикова Наталья Вадимовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ОДНОФАЗНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПЕРЕМЕННОГО
НАПРЯЖЕНИЯ В ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск 2015

Работа выполнена в Федеральном Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электротехники
и промышленной электроники
РГАТУ имени П.А. Соловьева
Манин Алексей Васильевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электротехники
и промышленной электроники
МГТУ имени Н.Э. Баумана
Соловьев Владимир Алексеевич

кандидат технических наук,
инженер-программист
НПО «Криста»,
Маврин Сергей Владимирович

Ведущая организация

**ОАО «Конструкторское бюро
«Луч», г. Рыбинск**

Защита состоится 27 апреля 2015 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.01 в Московском авиационном институте по адресу: 125993, Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Предварительный заказ пропусков по телефону: 8-499-158-40-90

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ или по ссылке:

Автореферат разослан _____ 2015г.

Отзывы на автореферат просим отправлять в 2-х экземплярах, заверенных гербовой печатью, по адресу: 125993, Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.125.01
кандидат технических наук _____



А. В. Корнеенкова

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В рамках проводимой политики эффективного использования энергетических ресурсов развиваются и внедряются новые технологии, направленные на разработку энергосберегающих элементов, устройств, и материалов. В связи с этим, широкое распространение получили энергоэффективные светодиодные лампы на основе лейкосапфира. Одной из прогрессивных технологий получения лейкосапфира является выращивание его монокристаллов по методу Киропулоса с применением специализированных ростовых установок. Данные установки включаются в трехфазную сеть по однофазной схеме и имеют сложный процесс выращивания кристаллов, на который существенно влияют показатели качества электрической энергии. Так, скачки и провалы напряжения на установке в несимметричном режиме вызывают нарушение качества регулирования, что приводит к образованию в монокристалле дефектных включений.

Одним из критериев качества регулирования является стабильность спектра мощности на нагревательном элементе, который в данной системе напрямую связан с режимом регулирования напряжения в условиях несимметричного режима, поэтому о качестве регулирования можно судить по коэффициенту несимметрии. Применение мероприятий по снижению коэффициента несимметрии позволяет избавиться от резких изменений напряжения на нагревателе, тем самым улучшая качество регулирования переменного напряжения и обеспечивая стабильный спектр мощности нагревателя.

Анализ разработок в данной области показывает, что основным направлением является применение регуляторов переменного напряжения на базе трансформаторно-ключевых элементов. Однако существующие устройства не позволяют обеспечить прецизионное регулирование переменного напряжения, поскольку, во-первых, их низкое быстродействие не соответствует неравномерному характеру энергопотребления ростовых установок, во-вторых, они содержат в себе нелинейные элементы и основаны на фазном методе регулирования, в результате которого появляются высшие гармоники в спектральном составе тока и мощности на нагревателе, вносящие дополнительные искажения в сеть.

Таким образом, в целях устранения недостатков существующих технических решений необходимо, во-первых, обеспечить автоматизацию процесса регулирования переменного напряжения, обеспечивающую поддержание оптимального коэффициента несимметрии, во-вторых, увеличить быстродействие, в-третьих, минимизировать искажения, вносимые в сеть при работе регуляторов переменного напряжения.

Цель диссертационной работы

Улучшение параметров системы регулирования переменного напряжения

Задачи диссертационной работы

1. Исследование влияния несимметричного режима на качество регулирования переменного напряжения и стабильность спектра мощности

2. Анализ схемных решений существующих регуляторов переменного напряжения и устройств симметрирования

3. Исследование статических характеристик регулятора переменного напряжения на основе быстродействующего симметрирующего устройства (СУ) на базе магнитовентильных элементов (МВЭ) и определение его энергетических показателей.

4. Разработка математической модели и оптимизация параметров быстродействующего СУ на базе МВЭ.

5. Разработка инженерной методики построения быстродействующего СУ на базе МВЭ.

6. Разработка алгоритма управления быстродействующего СУ на базе МВЭ.

Методы исследований

Для решения поставленных задач в работе использовались теоретические и эмпирические методы исследования. В целях построения математической модели СУ использовались теория линейных электрических цепей, теория дифференциальных уравнений. Исследования режимов для предельных состояний СУ в зависимости от угла управления тиристоров проводились с помощью метода эквивалентных синусоид. Построение математической модели реализовано с помощью программной среды Matlab. В качестве средства контроля показателей качества электроэнергии применялся анализатор электропотребления AR-5 и программный пакет Power Vision.

Достоверность и обоснованность изложенных в диссертации данных и выводов обеспечивается применением технологии моделирования для решения основных исследовательских задач, сравнением результатов моделирования с результатами, полученными опытным путем и при использовании анализатора электропотребления AR-5 совместно с программным пакетом Power Vision.

На защиту выносятся:

- математическая модель быстродействующего СУ на базе магнитовентильных элементов;
- методика расчета параметров силовой цепи СУ на базе магнитовентильных элементов;
- система управления СУ на базе магнитовентильных элементов;
- инженерная методика построения быстродействующего СУ на базе магнитовентильных элементов.

Научная новизна. Полученные в диссертационной работе основные результаты являются новыми, а именно:

1) В систему управления однофазными регуляторами переменного напряжения в трехфазной сети предложено ввести быстродействующее симметрирующее устройство для обеспечения качества регулирования

2) Предложен алгоритм управления, позволяющий напрямую вычислять управляющее воздействие для симметрирующего устройства и обеспечивающий максимальное быстродействие

3) Проведено исследование влияния симметрирования на стабильность спектра мощности и времени симметрирования на качество регулирования.

Практическая ценность работы

Практическая реализации силового исполнительного СУ, выполненного на базе магнитовентильных элементов, и системы автоматического управления позволит улучшить параметры системы регулирования переменного напряжения, тем самым обеспечивая стабильный спектр мощности нагревателя и снижение брака продукции.

Реализация результатов

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях, специализирующихся на производстве как самих монокристаллов лейкосапфира, так и необходимом для их получения оборудовании: ООО «Рыбинские кристаллы» (г. Рыбинск), ООО «ТехноРыбинск» (г. Рыбинск), ОАО «Сектор» (г. Рыбинск), ФГБОУ ВПО РГАТУ имени П.А. Соловьева (г. Рыбинск).

Апробация работы

Материалы диссертационной работы представлены в докладах на конференциях: «XXXIX Гагаринские чтения» (2013г., г. Москва, «Разработка быстродействующего симметрирующего устройства на базе магнитовентильных элементов»), «Энергия-2013» (2013г., г. Иваново, «Повышение энергоэффективности комплекса установок по выращиванию монокристаллов»), «66 Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием» (2013 г., Ярославль, «Повышение энергоэффективности комплекса установок по выращиванию монокристаллов»), «Новые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: материалы 1-й всероссийской заочной научно-практической конференции» (2012 г., Бийск, «Быстродействующее симметрирующее устройство»).

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 100 источников. Содержит 149 страниц основного текста, 7 таблиц, 77 рисунков, 2 приложения.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы

В первой главе проведена оценка отрицательного влияния несимметричного режима, действующего в трехфазной сети на качество регулирования переменного напряжения. Установлено, что особенности температурного цикла выращивания монокристаллов определяют характер энергопотребления, поскольку автоматизированные процессы выращивания монокристаллов,

направленные на поддержание определенного температурного режима, сопровождаются резкопеременным отключением/подключением потребителей, тем самым вызывая нестабильность энергопотребления и скачкообразное изменение мощности. На рис. 1а представлен суточный график полной мощности цеха по производству монокристаллов - $S(t)$, демонстрирующий неравномерность и нестабильность энергопотребления на суточном интервале.

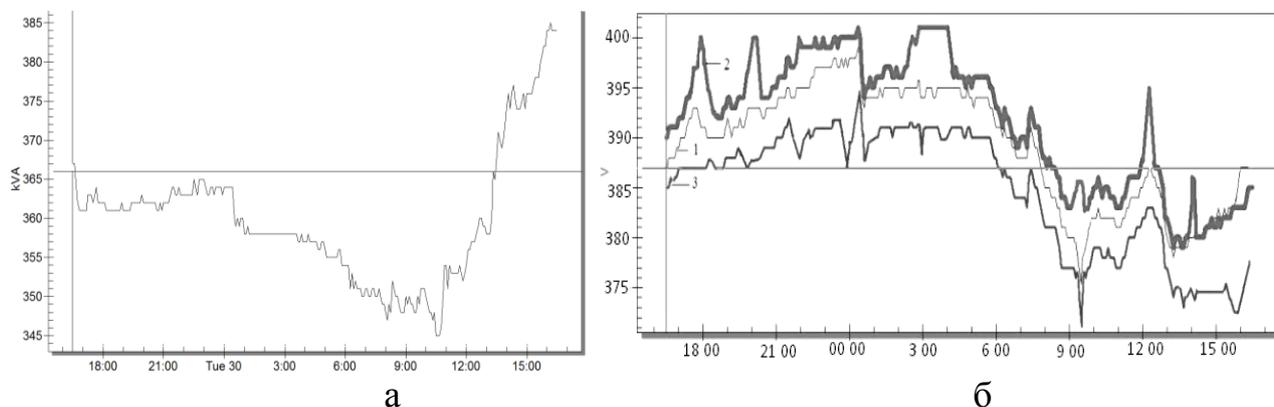


Рис. 1 – Энергетические процессы при выращивании монокристаллов
 а) график изменения мощности $S(t)$
 б) график изменения линейного напряжения: Ул(t): 1 - U_{AB} , 2 - U_{BC} , 3 - U_{CA}

Особенность электропитания ростовых установок заключается в том, что оно осуществляется от трехфазной электрической сети по однофазной схеме. Такое включение приводит к появлению в сети несимметричного режима, который сопровождается изменением фаз и величин однофазных питающих напряжений и характеризуется коэффициентом несимметрии и отклонением напряжения, причем, чем больше коэффициент несимметрии, тем больше отклонение напряжения. Для процесса, представленного на рис. 1,б средний коэффициент несимметрии $K_{2U}=2\%$; максимальное отклонение линейного напряжения $U_{BC}=5.53\%$.

Скачки и провалы напряжения на установке в несимметричном режиме оказывают существенное влияние на режимы регулирования температуры, причем относительное отклонение температуры на нагревателе T_c равно относительному отклонению мощности на нагревателе p_c и удвоенному относительному отклонению питающего напряжения [Юдин А. В. Методология создания автоматизированных систем обеспечения стабильности условий роста монокристаллов в электротермических установках: автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. - Рыбинск: РГАТУ. - 2010 г. С. 4]:

$$\frac{\Delta T_c}{T_c} = \frac{\Delta p_c}{p_c} = 2 \frac{\Delta U}{U} \quad (1)$$

Поскольку непосредственное измерение температуры фронта кристаллизации осложнено особенностями техпроцесса, то о его ходе возможно судить только на основе косвенных показателей - показателей напряжения и

мощности на нагревателе. Высокочастотные составляющие в спектре мощности нагревателя по мере проникновения в расплав поглощаются в большей степени, чем низкочастотные, что приводит к неравномерному выделению индуцированной мощности в расплав - горячие слои поднимаются, а более холодные опускаются в нижнюю часть тигля, при этом происходит увеличение высокочастотных составляющих в спектре мощности. [Юдин А. В., Афанасьев В. Д., Евдокимов Б. А. Применение показателей мощности на нагревателе для управления процессом роста монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса: Оборудование и технологии роста кристаллов. - ОТРК-2011. – 2011. С. 3].

Стабильность спектра мощности зависит от способа регулирования напряжения нагревателя - при амплитудном регулировании он представляет собой одну спектральную составляющую, соответствующую частоте сети, при фазовом, широко применяемом для данных установок, спектр содержит высшие гармоники. Поскольку критерий качества регулирования определяется спектром мощности, который в данной системе напрямую связан с режимом регулирования напряжения в условиях несимметричного режима, то о качестве регулирования можно судить по коэффициенту несимметрии. Отклонение от номинальной температуры, обусловленное нестабильностью спектра мощности в условиях несимметричного режима влечет за собой увеличение функции потерь (процент брака). Влияние несимметричного режима на выход годной продукции (ВГП) выражается эмпирической зависимостью (2).

$$ВГП = \frac{100}{\exp^{0,2K_v}}, \% \quad (2)$$

Исходя из данной зависимости видно следующее: если коэффициент несимметрии K_v равен 2%, то выход годной продукции составляет 70 %; если коэффициент несимметрии достигает 4%, то выход годной продукции составляет всего 50 %. Таким образом, применение мероприятий по снижению коэффициента несимметрии позволит избавиться от резких изменений напряжения на нагревателе, тем самым обеспечивая стабильный спектр мощности и улучшить параметры системы регулирования переменного напряжения.

Во второй главе в качестве мероприятия по улучшению системы регулирования переменного напряжения предлагается схемотехническое решение быстродействующего симметрирующего устройства (СУ) на базе схемы Штейнметца с использованием магнитовентильных элементов - элементов с электромагнитными связями (МВЭ) (рис.2, а). Силовая часть межфазного СУ представляет собой трехстержневой трансформатор с последовательно соединенными обмотками и конденсатор. В канал управления параметрами установки включен фазоуправляемый регулирующий (тиристорный) элемент VS, вынесенный из силовой цепи в контур регулирования, что позволяет снизить вносимые в сеть искажения.

Особенностью такой схемы является осуществление плавного регулирования величины реактивного сопротивления (проводимости межфазного СУ) по принципу переменной структуры. Изменение параметров проводимостей

происходит посредством фазоуправляемого тиристорного ключа при естественной коммутации по сигналу управления для обеспечения требуемого коэффициента несимметрии. При изменении угла открытия тиристора α будет изменяться структура схемы. При закрытом тиристоре данная установка представляет собой эквивалент практически идеального конденсатора с емкостной проводимостью (b_c) (рис. 2, б), при открытом - эквивалент индуктивного элемента с индуктивной проводимостью (b_L). (рис. 2, в). Скорость изменения характера проводимости и ее величины определяется периодом сетевого напряжения, что вполне удовлетворяет условиям быстродействия.

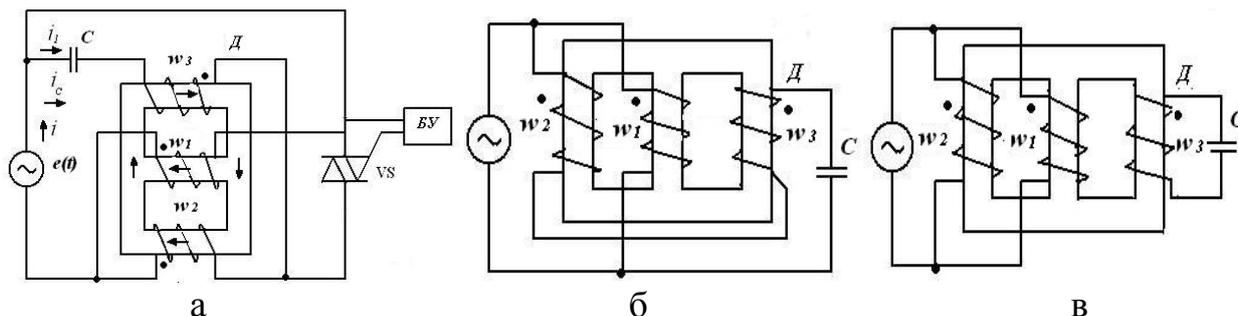


Рис.2. Принципиальная схема межфазного СУ на базе магнитовентильных элементов с переменной структурой а) базовый вариант СУ; б, в) СУ в предельных режимах работы силовой цепи: б-закрытое состояние тиристора, в-открытое состояние тиристора; VS – тиристорный ключ с импульсно-фазовым управлением, осуществляющий регулирование величины реактивной мощности СУ; Д – трехстержневой дроссель; БУ – блок импульсно-фазового управления тиристорами VS.

Статическая регулировочная характеристика, которая представляет собой закон изменения реактивной мощности СУ (Q) в зависимости от угла управления (α) выражена зависимостью (3) и представлена на рис.3. Регулировочная характеристика устройства имеет линейную зависимость, что является удобным с точки зрения управления.

$$Q(\alpha) = -\frac{U_m I_{1mЭ}}{2\pi} [\pi - (\beta - \alpha) + \sin(\beta - \alpha)] \sin \varphi_{(1)} + \frac{U_m I_{1mЭ}}{2\pi} [(\beta - \alpha) - \sin(\beta - \alpha)] \sin \varphi_{(1)}, \quad (3)$$

где U_m – максимальное значение напряжения сети; $I_{1mЭ}$ и $I_{1mЭ}$ – максимальные значения эквивалентного тока в первом и втором предельных режимах, соответствующих закрытому и открытому состояниям тиристоров, α – угол открытия/включения тиристоров, $\beta = \pi + \delta$ – угол выключения тиристоров, δ – угол запираания тиристоров, $\varphi_{(1)}$ – угол сдвига фаз между напряжением сети и первой гармоникой тока симметрирующего устройства.

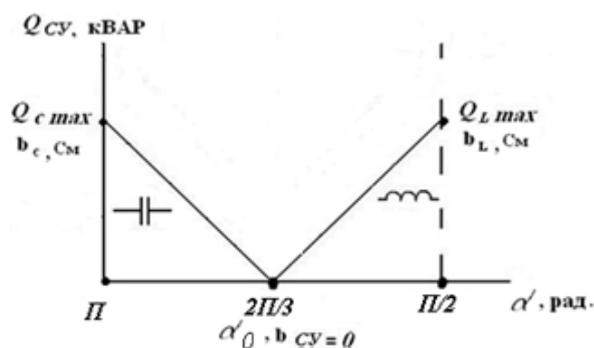


Рис. 3. Регулировочная характеристика СУ- Q (α)

Исследование гармонического состава тока СУ при различных углах управления тиристором α с целью определения уровня вносимых в сеть искажений показало, что наибольшее значение тока тиристора при наибольшей глубине регулирования не превышает 15-20% от номинального тока СУ. Доля уровня высших гармоник тока, генерируемых в сеть тиристорными элементами, не превышает 5% от основной гармоники, в связи с этим, использование СУ не влечет за собой появление существенных дополнительных искажений в спектральном составе мощности нагревательного элемента и не влияет на качество регулирования переменного напряжения.

Третья глава посвящена разработке алгоритма управления СУ. Изменение нагрузок во времени приводит к тому, что регулирование параметров СУ осуществляется по ретроспективной информации величины нагрузки, при этом, в качестве информационных величин целесообразно использовать фазные токи, а в качестве параметров регулирования СУ - величины реактивной проводимости, компенсирующие токи обратной/нулевой последовательности в каждой фазе исполнительного органа. С учетом этого, для работы СУ по обеспечению симметрии разработана оптимальная система автоматического симметрирования, удовлетворяющая заданным техническим требованиям к быстрдействию в соответствие со структурной схемой, приведенной на рис. 4. Управляющий сигнал будет являться функцией тока нагрузки и содержать информацию обо всех трех фазных токах (условно - I_A, I_B, I_C). Параметрами регулирования СУ служат величины реактивных проводимостей b_C и b_L в соответствующих фазах.

Процесс симметрирования СУ осуществляется следующим образом. В идеальном случае, когда фазные токи трехфазной сети равны по модулю и отстают друг от друга по фазе на $\frac{2\pi}{3}$, межфазные симметрирующие устройства СУ 1,2 не должны создавать соответствующие реактивные сопротивления и их реактивные мощности равны нулю. При этом выходной сигнал с регулятора (МК) будет обеспечивать угол управления тиристоров на регулировочной характеристике α_0 (рис.3). Характер нагрузки здесь роли не играет – если она одинакова и однозначна во всех фазах, то и система линейных токов будет симметрична. При появлении несимметрии в сети необходимо создавать

межфазные реактивные L - или C проводимости соответствующих межфазных СУ, значения которых по величине определяются углами управления в зависимости от характера и величины однофазной нагрузки в текущий момент времени.

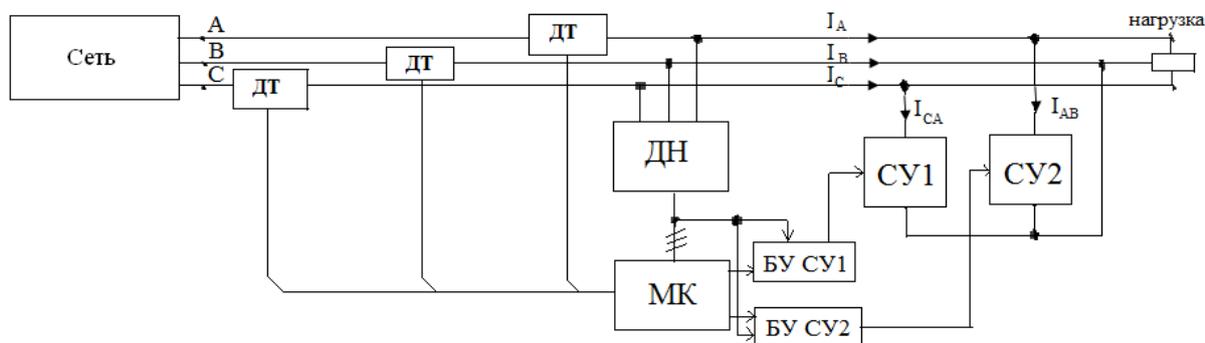


Рис. 4 – Структурная схема системы автоматического симметрирования: ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; МК – микроконтроллер; СУ1-СУ2 – симметрирующие устройства 1 и 2; БУ СУ1, БУ СУ2 – блоки управления симметрирующими устройствами

В качестве информационных величин для определения параметров СУ использованы значения фазных токов сети, к которой подключена нагрузка (I_A, I_B, I_C). В целях их измерения используется датчик токов (ДТ) на базе трансформатора тока - для каждой фазы свой. В микроконтроллере (МК) на основе анализа фазных токов задаются параметры СУ. Первым этапом является определение максимального значения тока из трех фазных, которому присваивается значение I_m и записывается в ячейку памяти МК. Далее определяется разность между I_m и другими токами:

$$|I_m| - |I_A| = \Delta I_A, |I_m| - |I_B| = \Delta I_B, |I_m| - |I_C| = \Delta I_C. \quad (4)$$

Полученные разности будут записаны в другие ячейки памяти данных МК. Таким образом, получаются три значения: одно равно нулю и два других отличны от нуля, причем в общем случае при изменении нагрузки они также изменяются. В зависимости от значений разностей между фазами А и В, А и С включенные симметрирующие устройства СУ1 и СУ2 должны иметь соответствующие реактивные проводимости b_C и b_L . Величина необходимой проводимости конкретного межфазного СУ определяется исходя из параметров нагрузки. При синтезировании параметров СУ в целях компенсации токов обратной последовательности были рассмотрены различные варианты включения нагрузок в трехфазную сеть. Универсальное выражение для определения текущей межфазной проводимости, которое может быть использовано для автоматического симметрирования трехфазных сетей при однофазной, двухфазной или трехфазной нагрузках, параметры которых могут произвольно меняться во времени, имеет вид:

$$\Delta b = \pm k \frac{\Delta I_{A,B,C}}{U} \quad (5)$$

где k - коэффициент, определяемый исходя из параметров электрической сети. Для случая трехфазной трехпроводной сети, $k = \frac{2}{3\sqrt{3}}$. Параметр k задается программно в микроконтроллере. Знак \pm представляет характер проводимости СУ: “+” – емкостной характер, “-” – индуктивный характер.

После вычисления параметров СУ осуществляется регулирование межфазного реактивного сопротивления путем открытия тиристоров - величина необходимой проводимости – емкостной или индуктивной определяется углом открытия α : для $b_C(\alpha_C)$ - от π до α_0 ; для $b_L(\alpha_L)$ - от α_0 до $\pi/2$. Таким образом, на выходе микроконтроллера будет формироваться сигнал, подаваемый на тиристоры блоков управления (БУ) межфазных СУ и обеспечивающий требуемый угол α . Блок управления ключевыми элементами (тиристорами) СУ строится по традиционной схеме фазоимпульсного управления по вертикальному способу. Для его работы необходим сигнал синхронизации. Этот сигнал снимается с датчика напряжения (ДН), в качестве которого используется трансформатор напряжения. Блок-схема описанного алгоритма симметрирования представлена на рис.5

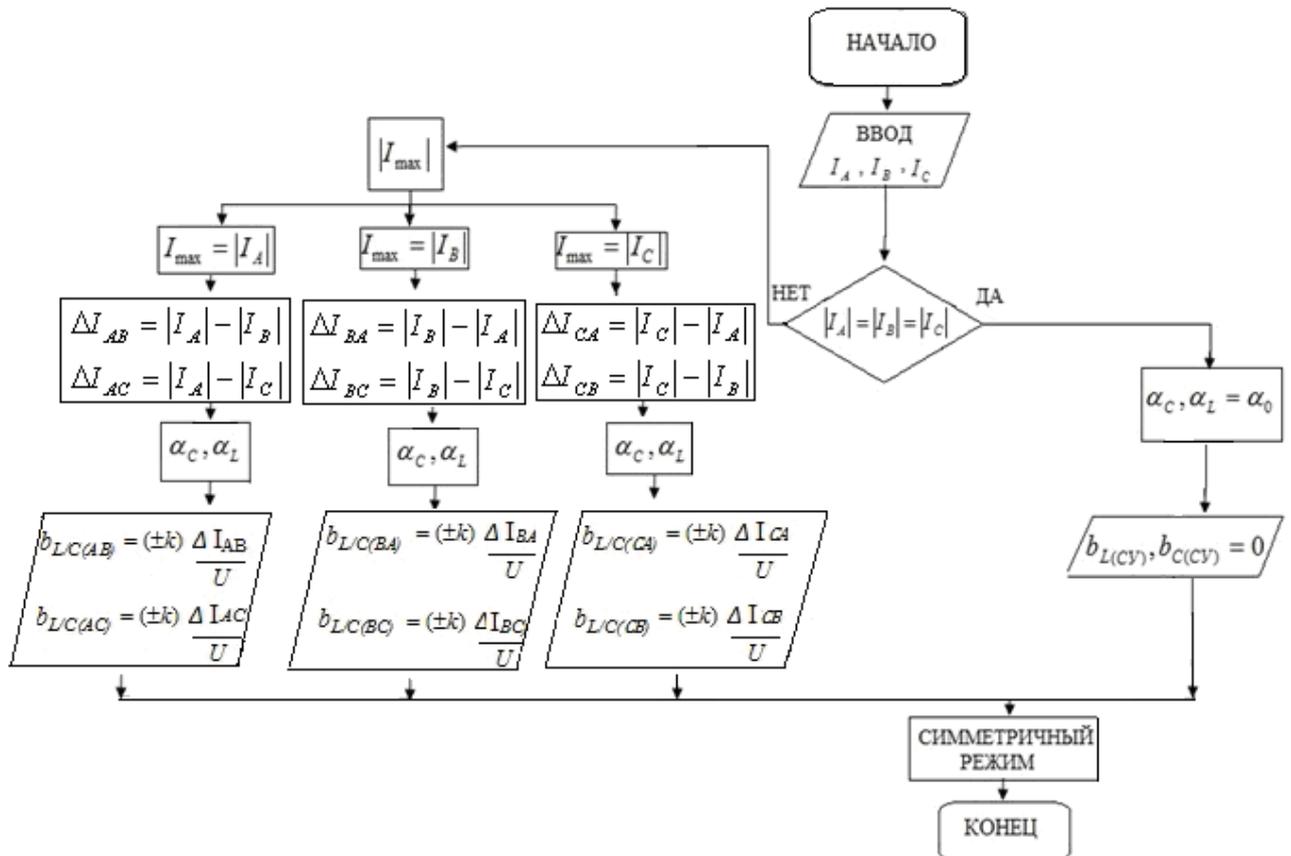


Рис. 5– Блок схема алгоритма симметрирования

В четвертой главе проведена оптимизация параметров силовых элементов СУ в программной среде MATLAB, обеспечивающих высокие энергетические и массогабаритные показатели. Результатом является программа, по которой определяется и выводится набор параметров, обеспечивающий максимальную и минимальную реактивную мощность в первом и втором предельных режимах работы СУ, соответствующих закрытому и открытому состояниям тиристоров.

Параметры, по которым проводится оптимизация:

- амплитудное значение индукции в первичной обмотке B_{1m} ;
- число витков вторичной и третьей обмоток w_2 и w_3 ;
- емкость конденсатора C ;
- площадь поперечного сечения магнитопровода S .

Блок-схема алгоритма оптимизации параметров СУ представлена на рис.6



Рис. 6- Блок-схема алгоритма оптимизации параметров СУ

Пятая глава посвящена разработке инженерной методики проектирования СУ на базе магнетовентильных элементов и экспериментальным исследованиям опытного образца, полученного на его основе. Построение быстродействующего симметрирующего устройства реализуется в соответствии с практической схемой реализации (рис. 7).

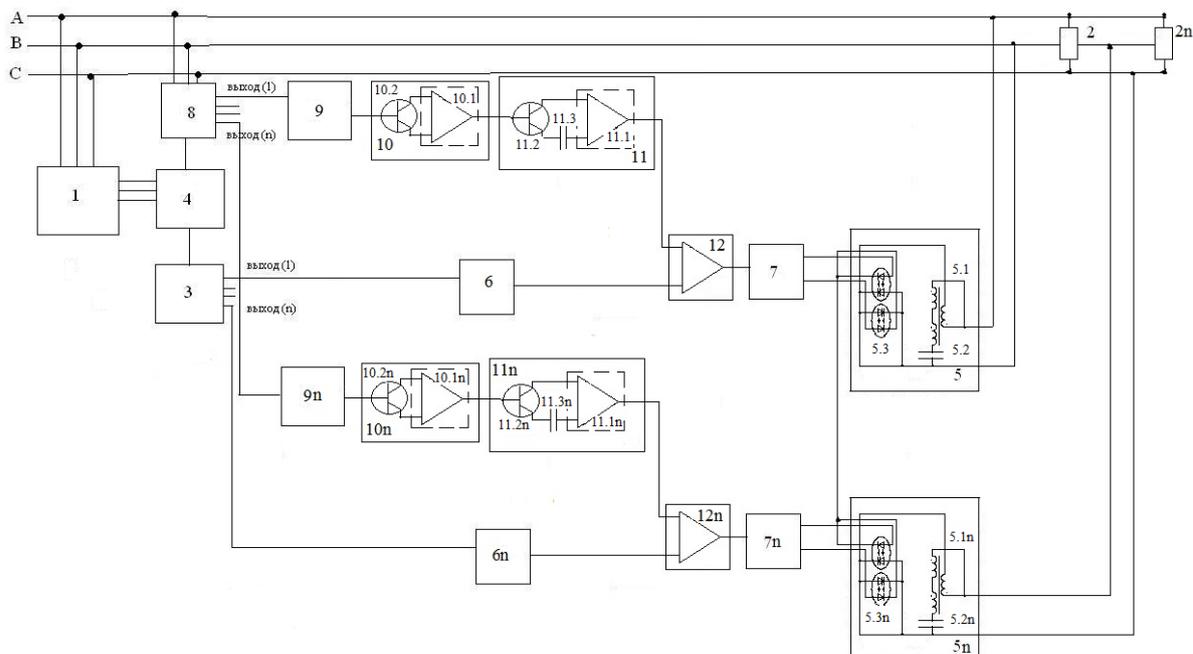


Рис.7 - Практическая схема реализации быстродействующего СУ на базе магнитовентильных элементов в комплексе с системой управления:

1 - датчик линейных токов; 2 (2n) – нагрузка, 3- микроконтроллер; 4 - согласующее устройство; 5(5n) - межфазное СУ: 5.1(5.1n)- трансформатор, 5.2(5.2n)-конденсатор, 5.3(5.3n) - тиристорный ключ; 6 -цифроаналоговый преобразователь (ЦАП); 7(7n)- блок управления межфазным СУ; 8- датчик напряжения, несимметрии; 9(9n) - фильтр синхронизирующего напряжения; 10(10n) - устройство для формирования синхроимпульсов: 10.1(10.1n) - операционный усилитель, 10.2(10.2n)- транзисторный ключ; 11(11n)-генератор пилообразного напряжения: 11.1(11.1n)- операционный усилитель, 11.2(11.2n) – емкость; 12(12n) – нуль-орган на базе операционного усилителя.

По результатам диссертационной работы были получены рекомендации к внедрению от специализированных предприятий по производству монокристаллов и ростового оборудования (ООО «Рыбинские кристаллы» (г. Рыбинск), ООО «ТехноРыбинск», ОАО «Сектор»). Была оформлена заявка на выдачу Патента №2014127108//07(043818), МПК H02 J 3/26. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс РГАТУ им. П.А. Соловьева в курсе «Энергетические установки промышленных предприятий» при проведении лабораторных работ по испытанию установок симметрирования электрической сети. В результате внедрения экспериментальной модели СУ на базе магнитовентильных элементов были получены графики линейных напряжений при работе ростовых установок с применением быстродействующего СУ на базе магнитовентильных элементов (на рис. 8). При этом расчетный коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности составил 1%. Таким образом, работа СУ на базе магнитовентильных элементов в комплексе с

системой электроснабжения установок для производства монокристаллов позволила обеспечить коэффициент несимметрии, равный 1%, что способствовало улучшению качества регулирования напряжения и снижению брака продукции, вызванного несимметрией на 15%.

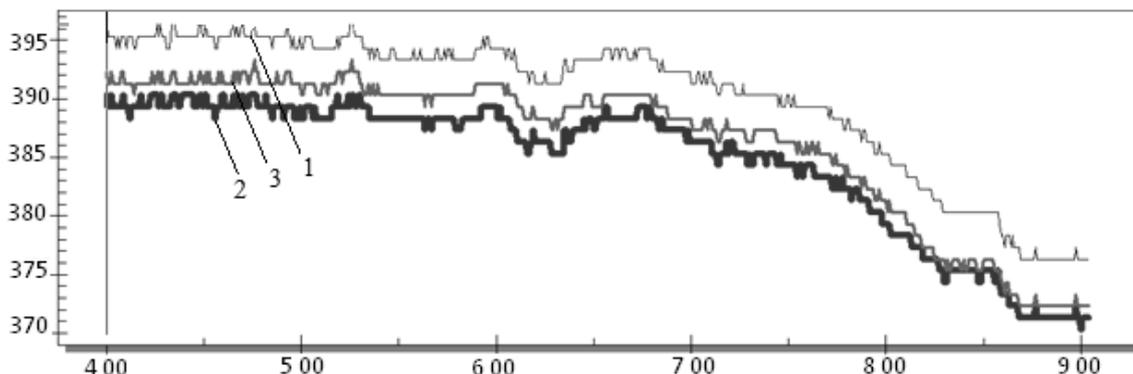


Рис.8 - Графики изменения линейного напряжения в результате применения быстродействующего СУ: 1 - U_{AB} , 2 - U_{BC} , 3 - U_{CA}

Заключение

1) Поскольку критерий качества регулирования определяется стабильностью спектра мощности на нагревательном элементе, который в данной системе напрямую связан с режимом регулирования напряжения в условиях несимметричного режима, то о качестве регулирования можно судить по коэффициенту несимметрии. В связи с этим, применение мероприятий по снижению коэффициента несимметрии, в частности – симметрированию трехфазной сети – позволяет обеспечить стабильность спектрального состава мощности путем регулирования напряжения сети при резких его колебаниях.

2) Проведенный анализ существующих СУ показал, что в условиях автоматизированного технологического процесса выращивания монокристаллов традиционные устройства симметрирования, основанные на схеме Штейнметца, оказываются малоэффективны вследствие низкого быстродействия и дискретного характера регулирования. В этих условиях необходимо применять быстродействующие СУ с непрерывным регулированием параметров нагрузки.

3) Предлагаемое СУ на базе МВЭ оказывается наиболее приемлемо в условиях прецизионного процесса выращивания монокристаллов. Для работы СУ по обеспечению симметрии сети в системе автоматического регулирования разработана система автоматического симметрирования. Скорость регулирования, составляющая 20 мс, адекватна характеру энергопотребления ростовых установок и отвечает поставленной задаче обеспечения быстродействия.

4) Применение автоматизированной системы симметрирования в комплексе с СУ на базе магнитовентильных элементов и предложенным алгоритмом управления позволяет обеспечить быстродействующее симметрирование в сетях с резкопеременными параметрами нагрузки и повысить энергоэффективность как самой питающей сети, так и установок по выращиванию монокри-

сталлов за счет поддержания стабильного напряжения и снижения брака продукции.

5) Математическая модель СУ на базе магнитовентильных элементов, реализованная в программной среде MATLAB позволяет оптимизировать параметры силовых элементов с целью обеспечения высоких энергетических и массогабаритных показателей.

6) СУ на базе магнитовентильных элементов имеет высокие удельные массогабаритные показатели и удовлетворяет эксплуатационным требованиям симметрирования нагрузок с нелинейным характером энергопотребления. В структуре СУ силовые элементы имеют меньшую установленную мощность по отношению к номинальной мощности СУ.

7) Исследование гармонического состава тока в цепи тиристорov при работе быстродействующего СУ на базе магнитовентильных элементов показало, что доля уровня высших гармоник в силовой цепи коммутационного ключа не превышает 5% от основной гармоники. В связи с этим, искажения, вносимые в сеть при работе регуляторов переменного напряжения, будут минимальны.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1) **Чижикова, Н. В.** Влияние несимметричного режима электрической сети на работу потребителей. [Текст]. /Н. В. Чижикова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, Иваново, 2013 г.- № 6

2) **Чижикова, Н. В.** Симметрирующее устройство многоплечевой трехфазной нагрузки [Текст] / Н. В. Чижикова, В. В. Юдин, А. В. Манин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева, 2010. - №3(18). – С. 276 – 281.

3) **Чижикова, Н. В.** Повышение энергоэффективности работы установок по производству монокристаллов методом Киропулоса [Текст] / Н.В. Чижикова, А. В. Манин, В. В. Юдин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТА имени П.А. Соловьева, 2011.- № 2 (21).- С.126-129

4) **Чижикова, Н. В.** Модульный алгоритм управления быстродействующим симметрирующим устройством [Текст] / Н.В. Чижикова // Вестник Рыбинского государственного авиационного технологического университета им. П.А. Соловьева, 2013 г. - № 1 (24). - С. 151-155

Из материалов конференций, семинаров чтений

1) **Чижикова, Н. В.** Повышение энергоэффективности комплекса установок по выращиванию монокристаллов [Текст]/ Н. В. Чижикова// Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: материалы конференции. Т.3, ч.2. – Иваново: ФГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, - 2013. - С. 70-72

2) **Чижикова, Н. В.** Разработка быстродействующего симметрирующего устройства на базе магнитовентильных элементов [Текст] / Н. В. Чижикова // XXXIX Гагаринские чтения: в 9 т. – Т. 1. Материаловедение и технологии материалов: - тез. докл. – М.; МАТИ, 2013. С. 98 – 99; Т. 1. Механика и моделирование материалов и технологий: - тез. докл. – М.; МАТИ, 2013. С. 173 – 174

3) **Чижикова, Н. В.** Повышение энергоэффективности комплекса установок по выращиванию монокристаллов [Текст]/ Н. В. Чижикова // 66 Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: в 2 т. – Т. 1. Машиностроение: тез. докл. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2013. – С. 166

4) **Чижикова, Н.В.** Быстродействующее симметрирующее устройство [Текст]/ А.В. Манин Н. В., Чижикова, О. А., Москалева // Новые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: материалы 1-й всероссийской заочной научно-практической конференции. – ООО «Международный центр технологий», Бийск, 2012.- С.39-44.

Патентные документы

1. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008611406.** Визуализация многомерных зависимостей в среде MATLAB/ Чижикова Н. В./заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО РГАТА им. П. А. Соловьева; заявл. 07.02.2008, зарег. 20.03.2008 г.

2. **Заявка на выдачу Патента №2014127108//07(043818),** МПК H02 J 3/26. Быстродействующее устройство для симметрирования установок для выращивания монокристаллов/ Чижикова Н.В., Манин А.В.; заявитель и патентообладатель Чижикова Н.В.; заявл. 02.07.2014