



eISSN 2311-2468
Том 5, № 15. 2017
Vol. 5, no. 15. 2017

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



АФОНИН В. В., КЕВБРИН В. А.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СВЕТОДИОДНОЙ СИСТЕМЫ**

Аннотация. В работе освещаются вопросы оценки количества светодиодов различных цветов при условии минимизации отклонения цветовой температуры от заданной величины. Предложен детерминистский подход оптимизации, который применяется в динамическом режиме создания многокомпонентной светодиодной системы, отвечающей требованиям, налагаемым на координаты цветности.

Ключевые слова: светодиоды, координаты цветности, минимизация, спектральные характеристики, спектр видимого диапазона.

AFONIN V. V., KEVBRIN V. A.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF MULTI-COMPONENT LED SYSTEM

Abstract. The paper deals with the estimation of the number of LEDs of different colors under the condition of minimizing the deviation of color temperature from the target value. The authors present a deterministic optimization approach that is applied dynamically creating a multi-led system that meets the requirements imposed on the chromaticity coordinates.

Keywords: LEDs, chromaticity coordinates, minimization, spectral characteristics, range of visible range.

Светодиоды и светодиодные комплексы или системы находят широкое применение во многих сферах человеческой жизнедеятельности. Их долговечность привлекает все большее внимание. Наряду с этим многие вопросы улучшения качества цветопередачи остаются еще открытыми. В обыденной жизни кажется, что вопрос остается только в снижении стоимости товарных образцов светодиодной продукции. Но ряд сфер применения светодиодов требует определенного их подбора в целях создания приемлемого спектра излучения. Данная задача требует комплексного решения. Помимо того, что необходимо решать задачу подбора светодиодов определенного цвета, в дальнейшем также требуется создание определенных компонент для реализации, например, определенной кривой силы света, создание определенных рассеивающих устройств и т. д.

В данной работе авторы остановились на решении задачи выбора светодиодов, которые со своими спектральными характеристиками позволят сформировать спектральную характеристику в пределах видимого света, позволят минимизировать ошибку отклонения координат цветности при заданной цветовой температуре. В такой постановке задача рассматривалась в [1], где в качестве метода оптимизации применялся прямой случайный

поиск. Его недостатки очевидны. Так, помимо большого количества испытаний, также требуются повторные испытания для усреднения результатов. И, тем не менее, результат остается случайным. В связи с этим авторы данной статьи обратились к детерминированным методам оптимизации, в первую очередь к методам нулевого порядка, поскольку в результате поиска в наличии имеются только табличные данные. Аппроксимация табличных данных, например, по методу наименьших квадратов, сопряжена с нарастающими погрешностями. Это, во-первых, а во-вторых, использование методов оптимизации первого или второго порядков, требует достаточно сильной локализации экстремума.

В качестве опорного метода нулевого порядка авторами выбран метод циклического покоординатного спуска с накоплением оптимальных решений, которые впоследствии подвергаются дополнительному анализу.

В качестве исходных данных были взяты спектральные характеристики (Вт/нм – нанометры), полученные на спектро радиометре типа OL 770 MULTI-CHANNEL SPECTRORADIOMETER в виде числовых данных. Тем самым исходные данные получены в абсолютных единицах спектральных характеристик светодиодов, которые используются для определения спектрального распределения излучения многокомпонентной светодиодной системы. При решении задачи оптимизации выбор цветовой температуры и координат цветности осуществлялся в соответствии с ГОСТ 54350-2011. Поэтому в качестве целевой функции принималась относительная погрешность отклонения текущих координат цветности от заданной гостированной величины.

Алгоритм решения поставленной задачи может быть выражен в виде следующих этапов.

1. Считывание из текстового файла номинальных паспортных данных светодиодов.
2. Проведение эксперимента по определению спектральных характеристик светодиодов – получение зависимости интенсивности излучения (Вт/нм) и светового потока (лм – люмены) от длины волны (нм – нанометры)
3. Считывание из текстовых файлов спектральных характеристик светодиодов – от синего до красного.
4. Интерполяция спектральных характеристик, возможно, приведение к одному размеру.
5. Задание границ мультипликативных коэффициентов освещенности светодиодов из диапазона $[0,9; 1,1]$ – экспериментального диапазона.
6. Определение суммарного светового потока как функции числа светодиодов каждого типа и коэффициентов освещенности.
7. Расчет координат цветности светодиодной системы.

8. Организация оптимального поиска минимума отклонения расчетных координат цветности от стандартных величин при заданной цветовой температуре и допустимой погрешности расчета. Имеем многомерную задачу оптимизации, целевая функция которой зависит от восьми типов светодиодов (белый, синий и т. д.).

8.1. Применение циклического покоординатного спуска.

8.2. Загрузка в контейнер лучших решений.

8.3. Определение наилучшего – оптимального решения поиска числа светодиодов, при которых минимизируется относительная погрешность расчетных значений координат цветности.

9. Графическое построение спектра излучения синтезированной многокомпонентной светодиодной системы.

10. Сохранение в текстовые и графические файлы результатов синтеза светодиодной системы.

Следует отметить, что циклический покоординатный спуск поиска оптимального решения применяется в самом процессе поиска минимальных отклонений координат цветности, когда, собственно рассчитывается так называемая сеточная или табличная функция – суммарный световой поток. В связи с этим и был выбран метод минимизации нулевого порядка, который не ограничивается оптимальным поиском на первом этапе, когда осуществляется циклический перебор координат – типов светодиодов и их количества. В силу интегрального характера суммирующего светового потока окончательное решение о распределении светодиодов по типам (типам цветности) осуществляется на этапе выбора наилучшего решения из накопленных возможных решений.

Для пояснения общей картины проектной задачи программирования в предлагаемом алгоритме выделим три прецедента и покажем для них UML (Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования) диаграммы последовательности:

1. Ввод данных (рис. 1).
2. Выполнение расчетов (рис. 2).
3. Сохранение информации (рис. 3).

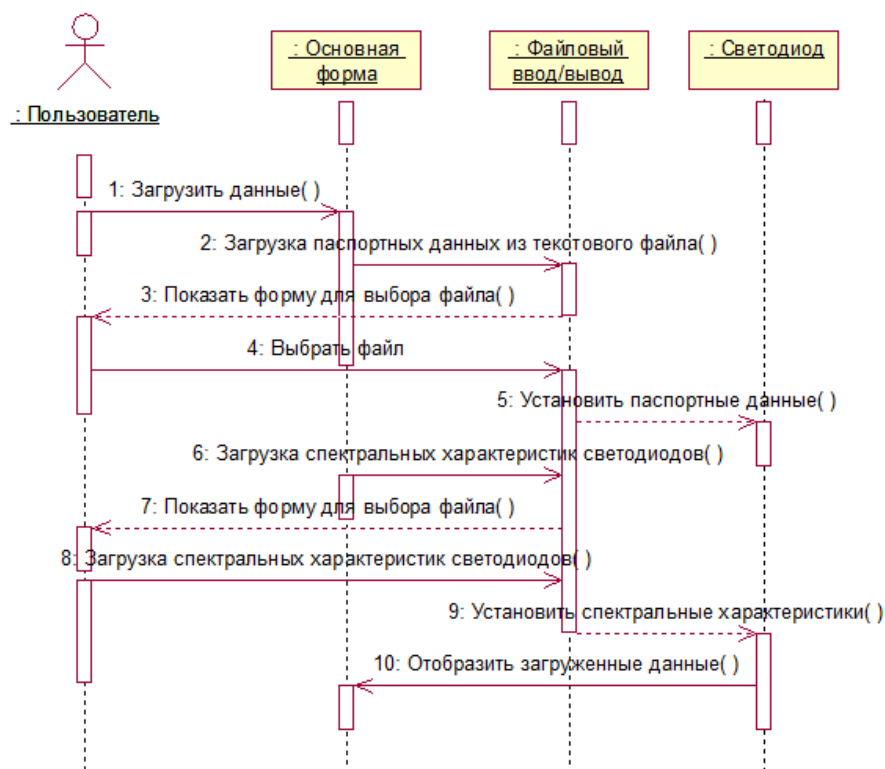


Рис. 1. Диаграмма последовательности для прецедента «Ввод данных».

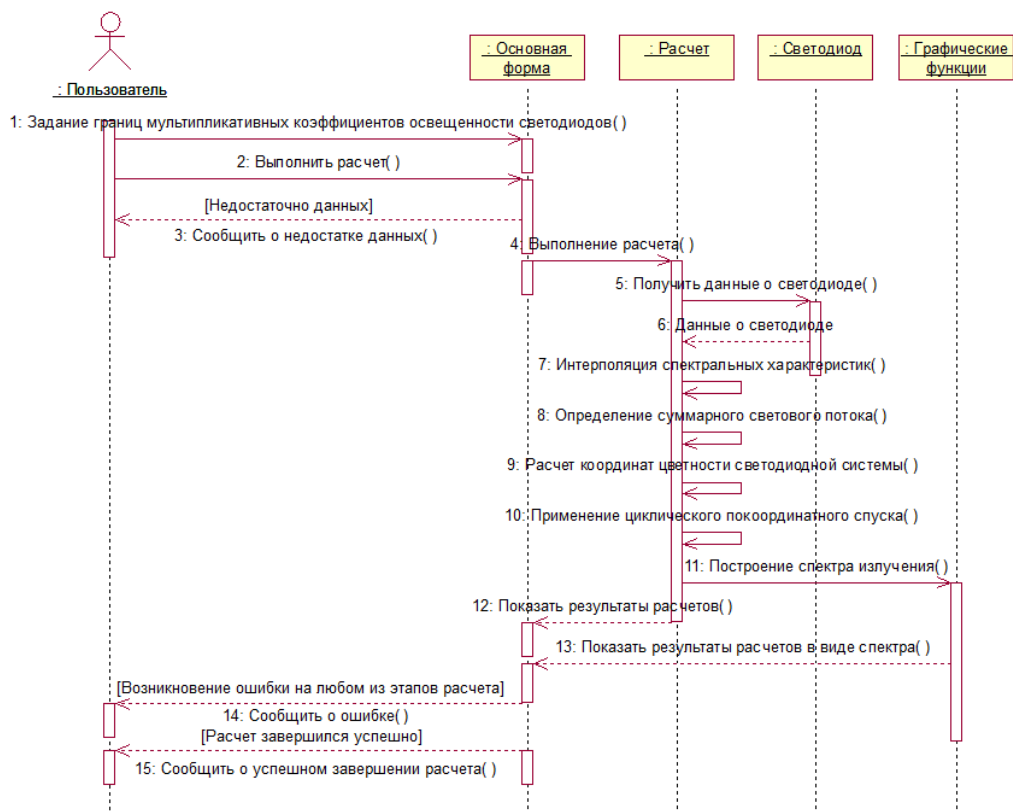


Рис. 2. Диаграмма последовательности для прецедента «Выполнение расчетов».

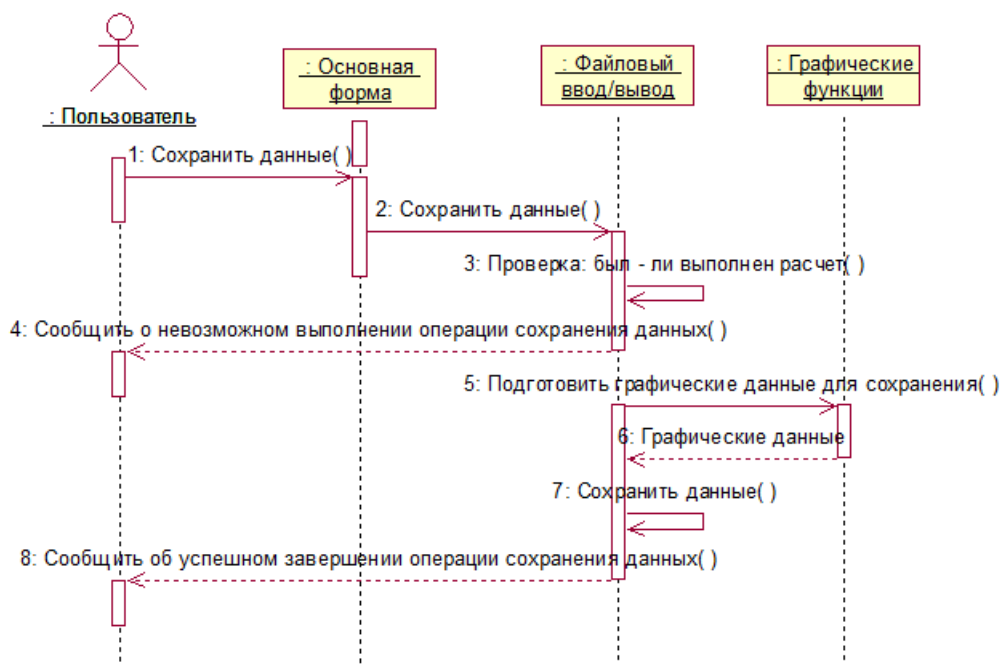


Рис. 3. Диаграмма последовательности для прецедента «Сохранение информации».

Продемонстрированные диаграммы показывают связи объектов, их проявления, упорядоченные по времени. Они представляют собой взаимодействия как упорядоченную последовательность событий. Рисунок 2 – это основная диаграмма последовательности. На ней используются четыре класса: 1. Основная форма – интерфейс для ввода/вывода информации доступных пользователю; 2. Расчет – класс, содержащий в себе основные функции по преобразованию данных и выполнению расчетов; 3. Светодиод – представляет собой набор свойств и методов, описывающих светодиод; 4. Графические функции – класс, содержащий набор функций для обработки графической информации.

Основная часть алгоритма будет выполняться внутри класса «Расчет». Файловый ввод/вывод реализован отдельным классом, он активно взаимодействует с графическими функциями, реализованными в собственном файле программы. Главным классом является «Светодиод». Он хранит в себе основную часть всех вводимых данных для каждого типа светодиода. Результаты расчетов представлены в интерфейсной части программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин В. В., Борискина А. А., Коваленко О. Ю. Математическая модель для определения колориметрических характеристик многокомпонентной светодиодной системы // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 46.

ЖУКОВ С. А., ШИШОВ О. В.

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
НАЛОЖЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ**

Аннотация. Анализируются известные системы регулирования параметров токоизолирующего оборудования. Рассматриваются возможности оптимизации режимных параметров работы оборудования для наложения полимерной изоляции.

Ключевые слова: оптимизация, экструдер, система регулирования, автоматизация.

ZHUKOV S. A., SHISHOV O. V.

**OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF CONTROL SYSTEM
FOR APPLICATION OF POLYMER INSULATION
AT MANUFACTURING OF CABLE PRODUCTS**

Abstract. The established systems for regulating the parameters of current-insulating equipment are analyzed. The possibilities of optimizing the operating parameters of the equipment for applying polymer insulation are considered.

Keywords: optimization, extruder, regulation system, automation.

Основные показатели качества при производстве телефонного кабеля во многом определяются процессом наложения на токопроводящие жилы полимерной изоляции. В структуру технологического оборудования для наложения полимерной изоляции входят экструдер, ванна охлаждения и тяговое устройство. Однако параметры изоляции, определяющие эксплуатационные показатели качества кабеля, закладываются, в первую очередь, в экструдере.

В технологическом процессе производства кабелей в большинстве своем используют шнековый экструдер. Основа конструкции данного экструдера заключается в наличии шнека с винтовой канавкой или нарезкой. Данный шнек помещается в нагреваемый цилиндр, длина которого зависит от типа полимера и технологии его переработки [4].

Экструдер имеет три рабочие зоны: загрузки, плавления и дозирования, оптимизированное управление которыми определяет качество наложения полимерной изоляции. Функциональная схема экструдера представлена на рисунке 1.

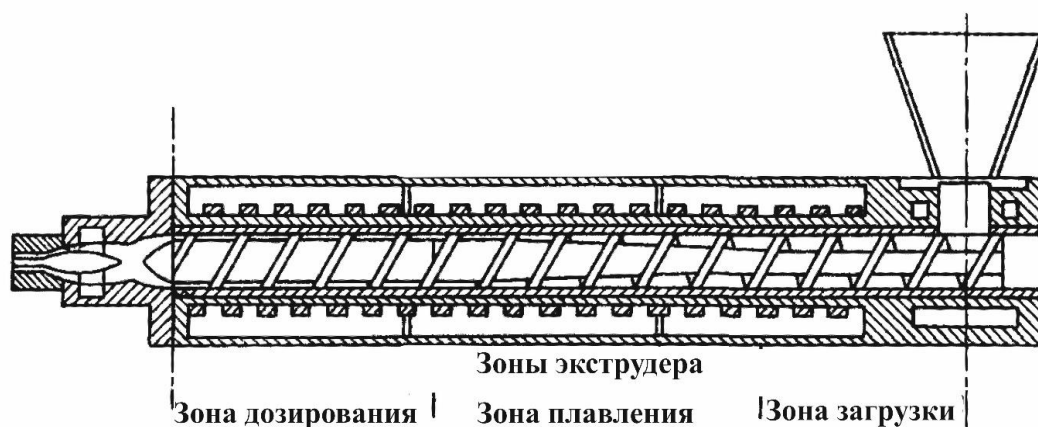


Рис. 1. Функциональная схема экструдера.

За зону загрузки принимают длину шнека экструдера от отверстия загрузки до места появления слоя расплава на поверхности шнека. В данной зоне происходит загрузка пластика в виде гранул. Попад в эту зону, гранулы захватываются нарезкой шнека и перемещаются вдоль оси шнека по направлению ко второй и третьей зонам.

Зона плавления представляет собой участок шнека от начала появления расплава до полного или частичного плавления гранул полимера с обязательным разрушением твердого слоя на части и образованием вязкого течения расплава. В данной зоне глубина нарезки шнека, как правило, уменьшается, что, в свою очередь, приводит к увеличению продольного давления, передаваемого уже через жидкий полимер.

В зоне дозирования происходит окончательное плавление оставшихся частиц, выравнивание температуры расплава полимера путем тщательного перемешивания расплава до придания ему однородных свойств за счет сдвиговых деформаций в каналах шнека. Работа именно этой зоны определяет производительность экструдера и непосредственно влияет на качество выходящего расплава. В зоне дозирования определяются три наиболее важных параметра, определяющих качество наложения полимерной изоляции:

- 1) температура расплава полимера на выходе зоны дозирования;
- 2) градиент давления расплава полимера на выходе зоны дозирования;
- 3) объемная производительность экструдера.

Данные параметры значительно влияют на формирование диаметра и диэлектрической проницаемости изоляции, на погонную емкость кабеля. Высокое качество наложения полимерной изоляции обеспечивается оптимальным управлением этими параметрами.

Задача оптимизации процесса наложения полимерной изоляции на токопроводящую жилу не нова. Непрерывное ужесточение требований, предъявляемых к кабельной

продукции, вынуждает предприятия отрасли искать новые подходы к совершенствованию систем управления наиболее ответственных зон производства. Решение указанной задачи обсуждается на конференциях и в научных работах. Однако в своем большинстве данные рассуждения представляют собой лишь рекомендации относительно выбора оптимальных критериев работы оборудования и действий оператора, но не определяют первопричины того, что мешает добиться высоких показателей качества, не дают конкретных рекомендаций к перестройке технологического процесса и оборудования.

На текущий момент толщина полимерной изоляции на большинстве предприятий, производящих кабель, регулируется путем изменения скорости протяжки кабеля через экструзионную линию за счет управления приводом кабестана. Функциональная схема управления данным процессом представлен на рисунке 2.

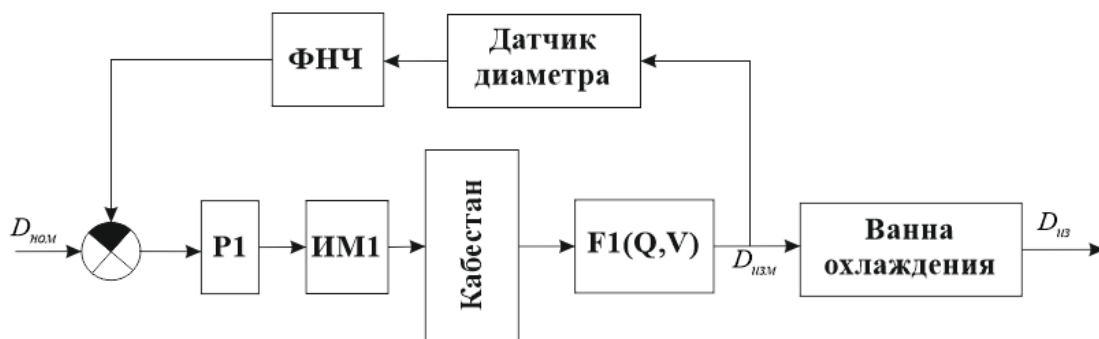


Рис. 2. Функциональная схема управления процессом наложения полимерной изоляции при управлении приводом кабестана: $D_{ном}$ – номинальное значение диаметра изоляции в месте измерения; $D_{изм}$ – диаметр изоляции, измеренный на выходе экструзионной линии; $D_{из}$ – диаметр изоляции, измеренный на выходе ванны охлаждения; PI – регулятор контура регулирования диаметра; $ИМ1$ – исполнительный механизм тянущего устройства (привод кабестана); $ФНЧ$ – низкочастотный фильтр; Q – весовая производительность экструдера; V – протяжки кабельной жилы; $F1$ – аналитическая зависимость, связывающая значения соответствующих параметров.

Датчик диаметра измеряет диаметр кабеля на выходе экструзионной линии. По вычисленной величине отклонения диаметра от заданного значения вырабатывается управляющее воздействие на привод принимающего устройства. При заданной весовой производительности экструдера диаметр изоляции будет уменьшаться при увеличении скорости протяжки кабельной жилы и увеличиваться – при ее уменьшении. Подобная система регулирования диаметра изоляции кабеля применяется повсеместно. Она способна устранять низкочастотные нерегулярности диаметра полимерной изоляции, связанные с неравномерностью нагрева полимера. Для исключения случайных высокочастотных

колебаний диаметра, помех, действующих на измерительные цепи, в схеме управления установлен низкочастотный фильтр.

Однако измерения диаметра кабеля на выходе экструзионной линии, проводимые специалистами на различных предприятиях отрасли, показывают, что кроме его низкочастотных отклонений от номинального значения, наблюдаются регулярные высокочастотные колебания. Регулярный характер этих колебаний однозначно свидетельствует, что он связан с фазами работы технологического оборудования. Такие исследования проводились и на предприятии ООО «Сарансккабель». Поиск возможных источников таких колебаний проводился на основе анализа применяемого технологического оборудования, а также учета результатов аналогичных исследований на других предприятиях страны.

Отсекая возможные причины, в качестве окончательного был принят вывод о том, что высокочастотные нерегулярности диаметра полимерной изоляции, как и низкочастотные, связаны с градиентом давления на выходе зоны дозирования экструдера.

Градиент давления является одним из основополагающих параметров, влияющим на качество наложения полимерной изоляции, так как чем больше перепад давления, тем большая часть расплава вращается вместе со шнеком, и доля расплава срезаемого с поверхности цилиндра нарезкой шнека уменьшается. Это, в свою очередь, приводит к понижению весовой производительности экструдера и появлению периодических неоднородностей диаметра изоляции кабельной заготовки, что и является конечным отрицательным эффектом.

Для устранения этого эффекта градиент давления необходимо рассматривать как возмущающее воздействие в системе стабилизации, влияние которого на неоднородность диаметра изоляции может быть уменьшено. Иными словами, система автоматического управления должна, помимо управления скоростью протяжки кабеля, также осуществлять качественное управление такими параметрами, как температура расплава полимера на выходе зоны дозирования и давление расплава полимера на выходе зоны дозирования экструдера. К аналогичным выводам приходят и авторы некоторых других исследований, в частности [1].

В работе [1] в качестве модели системы оптимизации режимных параметров токоизолирующего оборудования предлагается, в отличие от «традиционной» функциональной схемы процесса наложения полимерной изоляции (рис. 2), использование двухконтурной системы (рис. 3).

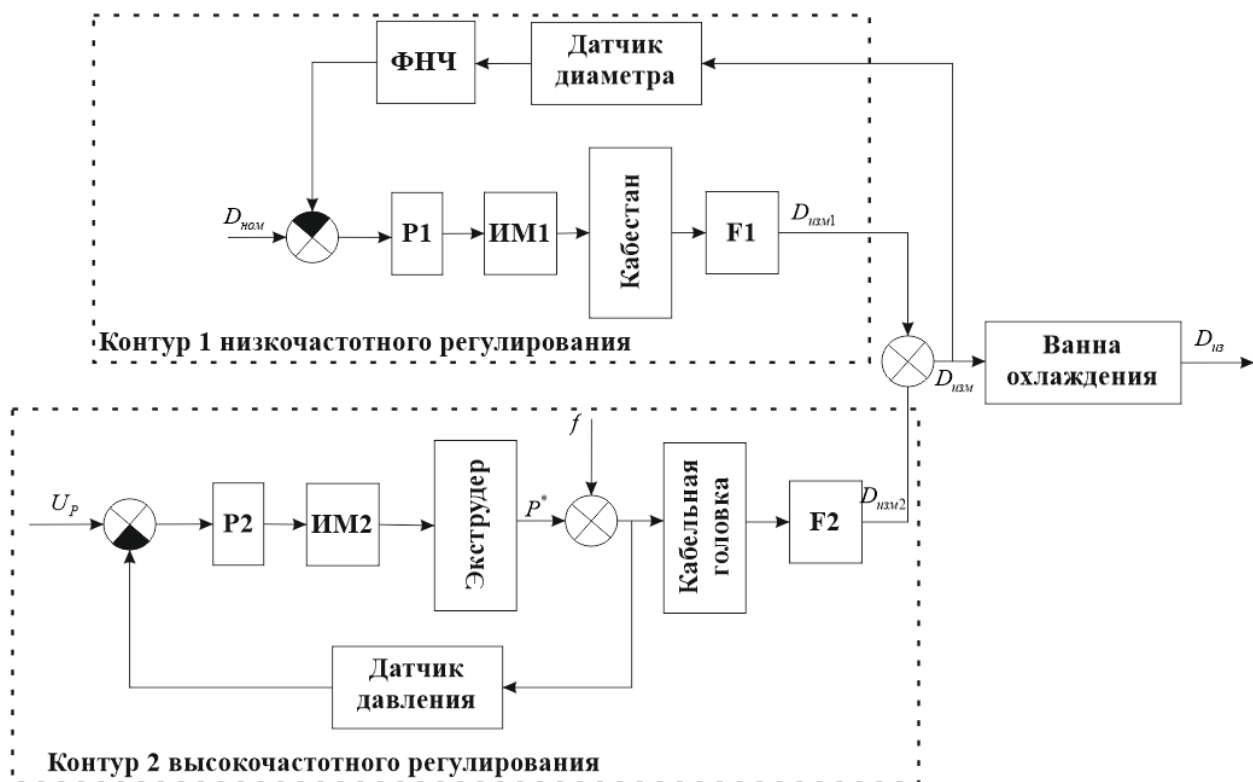


Рис. 3. Двухконтурная система стабилизации параметров режимов работы оборудования по наложению изоляции.

Данная модель, кроме элементов, представленных ранее на рисунке 2, включает:

$D_{изм2}$ – составляющие диаметра изоляции, формируемые в зависимости от весовой производительности экструдера;

$P2$ – регулятор контура регулирования давления;

$ИМ2$ – исполнительный механизм экструдера;

P^* – давление расплава в зоне дозирования;

U_P – номинальное значение давления расплава полимера;

f – возмущение;

$F2$ – аналитическая зависимость, связывающая значения соответствующих параметров.

В данной системе независимо регулируются давление расплава полимера в зоне дозирования экструдера путем изменения скорости вращения шнека (контур 1) и диаметр изоляции – скоростью протяжки кабельной жилы (контур 2). Контур регулирования давления расплава полимера предназначен для устранения высокочастотных нерегулярностей изоляции, а контур регулирования диаметра – низкочастотных.

Применение в системе управления производственной линии свободно программируемых контроллеров [5; 6], позволило без особого труда ввести в ее компоненты

необходимые для реализации второго контура системы стабилизации аппаратные средства и соответствующие программные модули. Проведенные практические реализации использования данной модели показали хорошие результаты. Применяя двухконтурную систему управления, удалось добиться стабилизации диаметра изоляции с существенно меньшими средними погрешностями, что подтвердило правильность выводов об их источниках и направлениях борьбы с ними.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митрошин В. Н. Регулирование давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера при пульсирующем градиенте давления // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2011. – № 1(29). – С. 39–44.
2. Митрошин В. Н. Синтез системы стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 237–239.
3. Раувендааль К., Пилар М. Д., Норьега Е., Харрис Х. Выявление и устранение проблем в экструзии / пер. с англ. – 2-е изд. – СПб.: Профессия, 2011. – 368 с.
4. Панов Ю. Т., Чинова Е. В., Ермолаева Л. А. Современные методы переработки полимерных материалов. Экструзия. Литье под давлением: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во Владим. ун-та, 2010. – 120 с.
5. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации. (Учебник). – М.: ИНФРА-М, 2016. – 365 с.
6. Шишов О. В. Современные технологии промышленной автоматизации. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 276 с.

ШИШОВ О. В., СЛУГИН А. Г.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОТЛОМ СТЕРИЛИЗАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ КОНСЕРВНОЙ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. Рассматривается реализация системы управления котлов стерилизации, применяемых в пищевой промышленности при консервировании продуктов. Предлагаются подходы, позволяющие минимизировать расходы энергии в ходе стерилизации за счет оптимизации процесса регулирования температуры и давления.

Ключевые слова: котел, стерилизация, система управления, программируемый логический контроллер.

SHISHOV O. V., SLUGIN A. G.

IMPROVING STERILIZER CONTROL EFFICIENCY AT CANNERY PRODUCTION

Abstract. The article considers a practical realization of sterilizer control system used in the food industry for product canning. The authors suggest some approaches that allow to minimize sterilization energy costs by optimizing the temperature and pressure control.

Keywords: boiler, sterilization, control system, programmable logic controller.

Достаточно часто можно столкнуться с ситуацией, когда базовое технологическое оборудование, даже проработав много лет, еще полностью работоспособно и находится в относительно хорошем состоянии, а электронные узлы системы управления этим оборудованием уже неоднократно ремонтировались, физически износились и морально устарели. При этом приходится или переходить на ручные режимы управления оборудованием или решать задачи срочной модернизации его системы управления. С учетом того, что за годы работы оборудования могло уже смениться несколько поколений электронной элементной базы, приведение системы управления в порядок часто сводится фактически к ее построению вновь.

Примером возникновения такой ситуации является использование в пищевой промышленности для стерилизации при производстве консервированных продуктов котлов марки КВМ. Даже после многих лет эксплуатации базовая (технологическая) часть котлов остается полностью работоспособной, чего порой нельзя сказать о компонентах системы управления. Перед нами стояла задача по автоматизации работы котла КВМ-4,5.

Данный аппарат предназначен для стерилизации в водной среде консервов (мясных, рыбных, молочных или плодоовощных) в стеклянной, пластиковой или металлической таре. Котел представляет собой цилиндрический резервуар со сферическим дном и крышкой. Котел оборудован устройствами для подачи внутрь воды. Нагрев воды и поддержание

заданного температурного режима стерилизации осуществляется за счет подачи в котел горячего водяного пара.

Процесс стерилизации проходит в несколько этапов. После загрузки в котел консервов и заливки воды производится подача пара. При достижении некоторой температуры происходит закрытие продувочного клапана, т.е. герметизация котла. С этого момента внутри котла начинает повышаться не только температура, но и давление – идет этап нагрева. Затем в течение заданного времени проводится процесс (этап) стерилизации, когда температура и давление стабилизируются на нужном уровне. После окончания этого этапа начинается третий – охлаждения. Температура и давление на этапе нагрева и охлаждения должны меняться с заданной скоростью.

Автоматизация работы котла предполагает включение в состав его оборудования датчиков и исполнительных механизмов, работающих с блоком управления. Структурная схема системы управления котлом, получаемая при этом, показана на рисунке 1.

Датчики минимального давления воды и пара, а также датчик закрытия крышки исключают запуск процесса стерилизации при отсутствии пара, воды, при открытой крышке котла. Во время заполнения котла водой датчик уровня сигнализирует, что котел полон. Через продувочный клапан удаляется воздух и избыточная вода. Задвижки подачи воды и задвижка подачи пара служат для подачи воды и пара. Меняя с их помощью уровень подачи воды и пара, в котле поддерживается нужная температура или реализуется программа необходимого ее роста или уменьшения. Для сброса лишнего давления служит сливная задвижка. Температуру и давление регистрируют датчики температуры и давления. Через сливной клапан после завершения процесса стерилизации сливается вода.

При разработке системы управления было решено использовать современные типовые технические средства [5; 6; 7]. Базовыми ее компонентами стали программируемый логический контроллер и операторная панель. Выбор конкретного контроллера производился исходя из требуемого объема программной памяти, количества дискретных и аналоговых входов/выходов, нужной вычислительной мощности. Решению поставленной перед нами задачи наиболее оптимально соответствовал контроллер ПЛК154 компании ОВЕН. Операторная панель ОВЕН ИП320 была выбрана исходя из необходимого объема сообщений, числа параметров, требуемых к одновременному отображению на экране, числа управляющих клавиш.

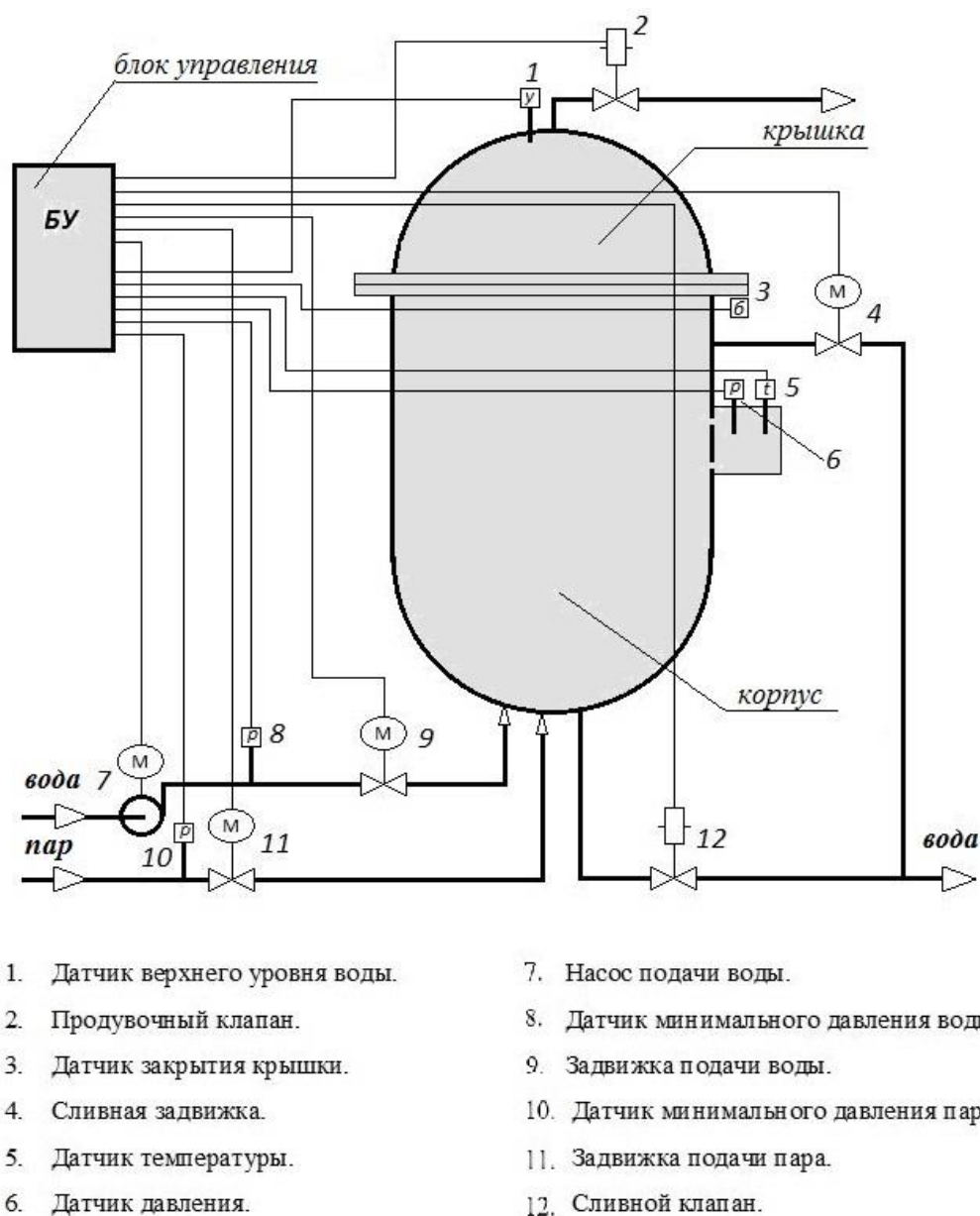


Рис. 1. Структурная схема управления котлом.

Применение «интеллектуальных» элементов для построения системы управления позволило поднять вопрос об оптимизации системы управления, включении ее в единую систему диспетчеризации, применяемой на предприятии.

Для консервной отрасли большой интерес представляет повышение экономичности стерилизационных аппаратов. Одним из направлений решения этого вопроса является оптимизация процесса регулирования температуры при стерилизации. Задача оптимизации управления температурой греющей среды по критерию энергетической эффективности заключается в отыскании таких коэффициентов регулятора, которые приводят к реализации управляющего воздействия, обеспечивающего необходимый ход выполнения стерилизации при минимальном расходе энергии.

К сожалению, считается, что более половины контуров систем автоматического управления, функционирующих на промышленных предприятиях, работает с неоптимальными коэффициентами регуляторов. В первую очередь, это характерно для работы с многомерными системами, при наличии сложных объектов с перекрестными связями, существенных изменениях параметров объектов управления при различных режимах их работы [1]. Это в полной мере справедливо для консервной промышленности [2; 3].

Различные виды стерилизуемой продукции обладают различными характеристиками с точки зрения теплоемкости и теплопроводности, что приводит к изменению параметров объекта (стерилизационной камеры), а значит, если стоит задача оптимального управления процессом, существует необходимость задания различных настроек регуляторов (применению индивидуальных коэффициентов закона регулирования) для каждого вида сырья [2].

Стерилизационная камера на каждом этапе стерилизации как объект регулирования ведет себя по-разному, т.е. выступает разными объектами. Поэтому оптимальный регулятор, управляющий ее температурой, должен обладать различным набором параметров для каждого этапа [3; 4].

Так как для каждого этапа будет определяться свой набор оптимальных коэффициентов регулятора, необходимо выбрать алгоритм переключения в момент перехода от этапа к этапу так, чтобы при этом обеспечивалась экономия энергетических ресурсов в данном случае уже за счет исключения перерегулирования.

Все эти особенности реализации регулирования температуры и давления в стерилизаторе было решено учесть в проводящейся нами работе.

Для контура управления температурой в стерилизационной камере был выбран дискретный ПИ-регулятор в рекуррентной форме:

$$e[k] = Q[k] - Y[k], \quad U[k] = U[k-1] + K_p \cdot (e[k] - e[k-1]) + K_t \cdot e[k-1]$$

с ограничениями $U[k] > 0$ и $U[k] < 0,5$, где

k – номер шага квантования;

$e[k]$ и $e[k-1]$ – ошибка управления на текущем (k -том) и предыдущем шагах квантования;

$Q[k]$ – заданное значение регулируемой величины (температуры в стерилизационной камере) на текущем (k -том) шаге квантования;

$Y[k]$ – сигнал обратной связи (температура в стерилизационной камере) на текущем (k -том) шаге квантования;

K_t , K_p – коэффициенты интегральной и пропорциональной составляющей регулятора;

$U[k]$ и $U[k-1]$ – значение управления на текущем (k -том) и предыдущем шагах квантования.

Использование более сложных алгоритмов управления в данной задаче себя не оправдывает. Введение дифференциальной составляющей в регулятор не требуется из-за плавного изменения управляющего воздействия и инерционности процессов, происходящих в процессе стерилизации.

В качестве алгоритма смены коэффициентов ПИ-регулятора в момент перехода от этапа к этапу предлагается использовать подход, заключающийся в том, что для расчета управления непосредственно после перехода на следующий этап технологического процесса используется лишь определенная доля K_x управляющего воздействия, определенного в конце предыдущего этапа: $U[k] = K_x \cdot U[k-1] + K_p \cdot e[k]$.

Получаемый процесс управления как бы «предсказывает» необходимое значение интегральной составляющей на первом шаге управления с новыми коэффициентами.

Таким образом, в ходе поиска оптимальных коэффициентов регулятора необходимо определить три тройки оптимальных коэффициентов: K_p , K_t и K_x . Использование какой-либо математической модели для расчета коэффициентов закона регулирования и анализа эффективности их выбора затруднительно из-за сложностей ее реализации, хотя попытки это сделать предпринимались неоднократно [2]. Вместе с тем при наличии определенного опыта оператор может достаточно точно произвести их подбор непосредственно в ходе технологического процесса. Однако для этого ему нужна точная развернутая информация о течении процесса, об изменениях температуры и давления в его ходе, о формировании управляющих воздействий. Нами для этого было предложено использовать возможности, предоставляемые современными контроллерами.

При настройке системы управления к контроллеру ПЛК154 подключался персональный компьютер с установленной системой программирования (в данном случае пакетом CoDeSys). После проведения необходимых настроек на экран компьютера можно выводить необходимые тренды – графики, показывающие с заданной периодичностью изменения заданных параметров процесса измеряемых контроллером. При необходимости их можно записывать в файл с форматом, читаемым обычным офисным приложением Excel. Все это позволяет рассматривать, накапливать, сравнивать информацию о ходе технологического процесса, в том числе решать вопросы по настройке регулятора.

Применение в системе управления универсальных промышленных контроллеров, имеющих стандартные интерфейсы и способных обмениваться с другими вычислительными компонентами информацией по известным и распространенным сетевым протоколам, позволило подойти к решению задачи диспетчеризации – сбору обобщающих данных с нескольких котлов в едином центре, формированию отчетов и архивировании данных. Предложены решения с применением SCADA системы на персональном компьютере и с использованием операторной панели компании ОВЕН СП307.

Внедрение данной системы управления позволяет гибко подходить к выбору параметров стерилизации. Используемые алгоритмы позволяют уменьшить перегревы при переходе от этапа к этапу в процессе стерилизации консервов и достичь определенной энергоэффективности по сравнению с традиционными подходами к организации регулирования. Система диспетчеризации упрощает вопросы контроля за производством.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варламов И. Г., Залуцкий И. Е., Серёжин Л. П. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем управления // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 7. – С. 1–7.
2. Власов А. В., Кайченев А. В., Маслов А. А. Исследование динамики теплообмена в стерилизационной камере автоклава // Рыб. хоз-во. – 2009. – № 6. – С. 77–79.
3. Власов А. В., Кайченев А. В., Маслов А. А. Критерии оптимизации управления температурой в автоклаве при стерилизации паром // Молодежь и современные информационные технологии: сб. тр. VIII Всерос. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых / ТПУ. – Томск, 2010. – С. 56–57.
4. Маслов А. А., Власов А. В., Кайченев А. В., Власова А. Р., Яценко В. В. Способ оптимального управления температурой в автоклаве на основе регулятора «с предсказанием» // Вестник Мурманского государственного университета. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 520–524.
5. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации. (Учебник). – М.: ИНФРА-М, 2016. – 365 с.
6. Шишов О. В. Современные технологии промышленной автоматизации. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 276 с.
7. Шишов О. В. Технические средства автоматизации и управления. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 397 с. +CD-R.
8. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / пер. с англ. В. А. Лотоцкого, А. С. Манделя; под ред. А. С. Райбмана. – М.: Мир, 1975. – 680 с.

БАТЫРКАНОВ Ж. И., КАДЫРКУЛОВА К. К., БЕЛЯЛОВ Ш. А.

**СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМИ ПРИВОДАМИ 3D-ПРИНТЕРА
ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ПРЕДПИСАННЫХ ДВИЖЕНИЙ**

Аннотация. Предложена оригинальная математическая модель шагового привода как объекта управления, на основе которой определяется алгоритм управления шаговым двигателем. Рассмотрены вопросы технической реализации синтезированных алгоритмов управлений, приведена структурно-функциональная схема для рассматриваемых функциональных элементов. Также рассматриваются вопросы погрешности позиционирования шагового двигателя и выбора его угловой скорости.

Ключевые слова: 3D-принтер, шаговый двигатель, шаговый привод, предписанная пространственная траектория, управление движением, единичный шаг, драйвер, число фаз.

BATYRKANOV ZH. I., KADYRKULOVA K. K., BELIALOV SH. A.

**SYNTHESIS OF CONTROL ALGORITHMS FOR 3D-PRINTER STEP DRIVES
FOR IMPLEMENTATION OF PRESCRIBED MOVEMENTS**

Abstract. The paper presents an original mathematical model of the step drive as a control object. Based on this model, the control algorithm for the stepper motor is determined. The issues of technical implementation of the synthesized algorithms are considered. The structural-functional scheme for the considered functional elements is provided. The authors also deal with the error positioning of the stepper motor and the choice of its angular velocity.

Keywords: 3D-printer, stepper motor, stepper drive, prescribed spatial trajectory, movement control, single step, driver, number of phases.

Введение. При проектировании и разработке 3D-принтера важное место занимают вопросы разработки систем управления приводами его рабочих органов. На сегодняшний день в качестве приводов многих типов 3D-принтеров используются приводы, построенные на шаговых двигателях (ШД). В конечном итоге система управления должна обеспечивать движение рабочих органов 3D-принтера по заранее заданным предписанным траекторным движениям. Для синтеза необходимых алгоритмов управления движения приводов по предписанным программам (траекториям), в первую очередь, требуется наличие математической модели динамики шагового привода как объекта управления. Насколько нам

известно, в описании промышленно выпускаемых 3D-принтеров информации о математической модели не приводится.

В связи с вышесказанным, целью данной работы является следующее: для 3D-принтера, использующего метод послойного наплавления (см. рис. 1), разработать метод синтеза алгоритмов управления по осуществлению движения шаговых приводов по предписанным программам.

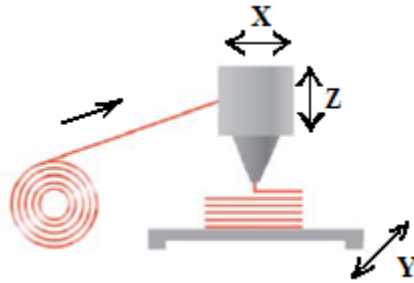


Рис. 1. Упрощенная модель 3D-принтера, использующего метод послойного наплавления.

Разработка математической модели динамики ШД как объекта управления. Прежде всего, приведем базовую информацию о ШД. Для всех типов ШД с помощью электронного коммутатора вырабатываются импульсы напряжения, которые подаются на обмотки управления, расположенные на статоре ШД. При этом каждый импульс обеспечивает поворот ротора на определенный угол, зависящий от конструкции ШД.

Для синтеза законов управления рассмотрим ШД с зубчатым передаточным механизмом на валу двигателя. При помощи этого механизма вращательное движение ротора двигателя преобразуется в поступательное движение механизмов 3D-принтера (в конечном счете – его печатающей головки).

Пусть на роторном валу ШД посажено (установлено) зубчатое колесо (шестерня) с радиусом R и угловым расстоянием между двумя зубьями $\Delta\alpha$ градусов, т.е. угол поворота ротора ШД при действии единичного импульса составляет $\Delta\alpha$ градусов. В дальнейшем требуется представить $\Delta\alpha$ в радианах. Перевод из градусов в радианы осуществляется по следующей формуле:

$$\Delta\alpha[\text{rad}] = \frac{3,14[\text{rad}](\Delta\alpha[\text{grad}])}{180[\text{grad}]} . \quad (1)$$

При действии единичного импульса на ШД с посаженной на валу его ротора шестерней с радиусом R , одиночный угловой шаг поворота ротора преобразуется в поступательное движение шестерни на расстояние равное

$$L_{\omega} = \Delta\alpha \cdot R, \quad (2)$$

где: $\Delta\alpha$ — шаг поворота ротора ШД при подаче единичного импульса (градусы);

L_{ϕ} — величина линейного шага шестерни при действии одного импульса на ШД [1].

Так как в ШД шаги осуществляются в дискретные моменты времени, то математическая модель ШД как объекта управления описывается с использованием конечно-разностного выражения

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + n_k(\Delta\alpha), \quad (3)$$

где: φ_k — текущее угловое положение ротора ШД на t_k -ом моменте времени;

n_k — количество управляющих импульсов, подаваемых на ШД за отрезок времени $[t_k, t_{k+1}]$;

φ_{k+1} — угловое положение ротора ШД в t_{k+1} -й момент времени.

Формула (3) используется тогда, когда требуемые перемещения рабочих органов 3D-принтера описаны в угловых координатах. Однако в большинстве случаев необходимые перемещения описываются в линейных координатах, например, когда применяется винтовой редуктор. При этом, аналогично (3), предлагается следующая математическая модель управления движениями рабочих органов 3D-принтера [1]

$$\begin{cases} X_{k+1} = X_k + n_{kx}l_{ux}; \\ Y_{k+1} = Y_k + n_{ky}l_{uy}; \\ Z_{k+1} = Z_k + n_{kz}l_{uz}, \end{cases} \quad (4)$$

где: X_k, Y_k, Z_k — текущие координаты рабочих органов принтера по осям X, Y, Z в k-й момент времени; $X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}$ — координаты рабочих органов по осям X, Y, Z в $(k+1)$ момент времени; n_{kx}, n_{ky}, n_{kz} — количества импульсов поданных на ШД приводов по осям X, Y, Z за указанный промежуток времени; l_{ux}, l_{uy}, l_{uz} — величины линейных шагов рабочего органа по осям X, Y, Z от действия одиночных импульсов на соответствующие ШД, при этом учитывается соотношение (2).

Синтез алгоритма управления шаговым приводом на основе предписанной траектории. Рассмотрим задачу, когда рабочие органы 3D-принтера (печатающие головки) совершают движения согласно табличным представлениям контрольных точек в изготавливаемых изделиях.

Для осуществления этой задачи математическая модель динамики шагового привода

приведена в виде (4).

Таким образом, в практическом плане задача управления ШД сводится к нахождению количества управляющих импульсов n_{kx}, n_{ky}, n_{kz} из формул (4) и подаче их на соответствующие ШД за отрезок времени $[t_k, t_{k+1}]$. При этом значения $X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}$ берутся из таблицы предписанных (требуемых) контрольных точек пространственной траектории движения рабочих органов 3D-принтера (таблица 1).

Проиллюстрируем построение предписанной пространственной траектории движения рабочих органов 3D-принтера с помощью рисунка 2.

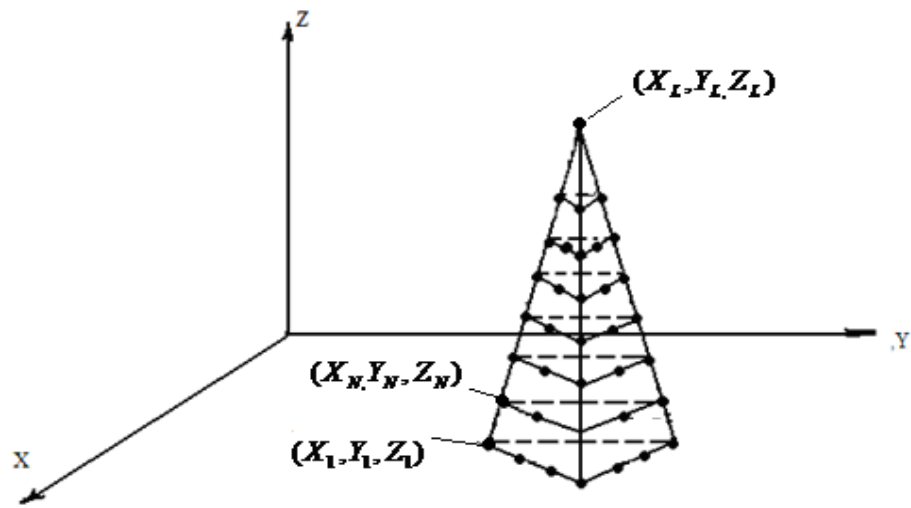


Рис. 2. Пространственная модель детали с нанесенными на нее контрольными точками.

По требуемой пространственной модели объекта с нанесенными на нее контрольными точками строим таблицу для предписанной траектории движения рабочего органа 3D-принтера (см. табл. 1).

Таблица 1

Предписанные координаты в различных точках траектории

t_s	t_1	t_2	...	t_k	t_{k+1}	...	t_L	t_{L+1}
x_s	x_1	x_2	...	x_k	x_{k+1}	...	x_L	x_{L+1}
y_s	y_1	y_2	...	y_k	y_{k+1}	...	y_L	y_{L+1}
z_s	z_1	z_2	...	z_k	z_{k+1}	...	z_L	z_{L+1}

Начало движения печатающей головки осуществляется с момента t_1 и начального положения (X_1, Y_1, Z_1) . Затем выполняется переход в положение (X_2, Y_2, Z_2) , соответствующее моменту времени t_2 . Далее движение осуществляется аналогично, и в конце первого цикла, соответствующего первому слою воспроизводимого объекта, печатающая головка приходит в начальное положение, т.е. (X_1, Y_1, Z_1) . Из этого положения осуществляется переход в положение (X_N, Y_N, Z_N) и затем движение осуществляется по второму слою объекта, воспроизводимого 3D-принтером.

Далее движение выполняется по третьему слою и т.д. Таким образом, слои могут наноситься последовательно, т.е. друг на друга. В конце работы осуществляется переход к конечному положению (X_L, Y_L, Z_L) .

Для определения l_{ux}, l_{uy}, l_{uz} в системе (4) нужна конкретная информация о шаговом двигателе и соединенного с валом двигателя редукторе.

Взяв ШД марки ДС4-6В и винтовой редуктор с длиной винта 74 мм и диаметром 3 мм. При этом экспериментально определено, что за одиночный импульс винтовой редуктор перемещает нагрузку на 1,6 мм. Значит $l_{ux} = l_{uy} = l_{uz} = 1,6$ мм.

Отметим, что подсчет количества необходимых импульсов по формулам (4) для обеспечения перемещений, задаваемых таблицей 1, может приводить к тому, что расчетное количество импульсов (для определенности – по X-оси)

$$n_k = (X_{k+1} - X_k) / l_{ux}$$

будет выражаться не целым числом. В этом случае берется ближайшее целое число (по стандартным правилам округления), а максимальная погрешность позиционирования ШД составит

$$\varepsilon_{\max} = 0,5l_{ux}.$$

Следовательно, чтобы уменьшить погрешность позиционирования ШД нужно уменьшить l_{ux} . А для этого, в свою очередь, нужно уменьшить величину единичного шага (поворота ротора) $\Delta\alpha$, которая достигается путем выбора ШД с необходимым количеством полюсов (в том числе, эквивалентных полюсов). Необходимая скорость движения ШД обеспечивается путем уменьшения или увеличения величины отрезка по времени $[t_k, t_{k+1}]$ при фиксированных количествах импульсов, которые должны быть поданы на ШД за этот отрезок. Уменьшение отрезка по времени увеличивает скорость движения (перемещения) ШД и, как следствие,

печатающей головки [2; 3].

Вопросы технической реализации системы управления шаговыми двигателями прототипа 3D-принтера. Приведем технические реализации отдельных функциональных элементов прототипа 3D-принтера, которые разработаны авторами и используются на кафедре «Автоматического управления» КГТУ им. И. Раззакова для образовательных и исследовательских целей.

Для управления ШД используется компьютер (ПЭВМ), куда предварительно записывается информация о всех параметрах ШД – таблица предписанных движений рабочих органов 3D-принтера. В компьютере, на основе уравнений системы (4) и заданной величины отрезка по времени $[t_k, t_{k+1}]$, осуществляется подсчет необходимого количества управляющих импульсов для подачи на обмотки ШД в течение каждого временного отрезка.

Структурно-функциональная схема системы управления ШД показана на рисунке 3. Она включает следующие объекты: порт LPT (в силу традиционности использования LPT порта для передачи управляющих импульсов на устройство управления и простоты соответствующих схемотехнических решений); шины данных и управления; контроллер; три электронных драйвера и собственно ШД.

От компьютера по интерфейсу LPT приходят сигналы по первым четырем шинам данных для управления обмотками двигателя ШД; по следующим трем шинам передаются управляющие сигналы выбора ШД. Эти сигналы поступают на контроллер. В нем происходит выбор двигателя, который должен работать в конкретный момент времени, путем подачи сигнала выборки на соответствующий канал ШД. Затем импульсы управления подаются в электронный драйвер, в котором они усиливаются по току и напряжению. В конечном итоге эти преобразованные импульсы передаются на обмотки соответствующих ШД, которые и обеспечивают непосредственное управление режимами работы двигателей.

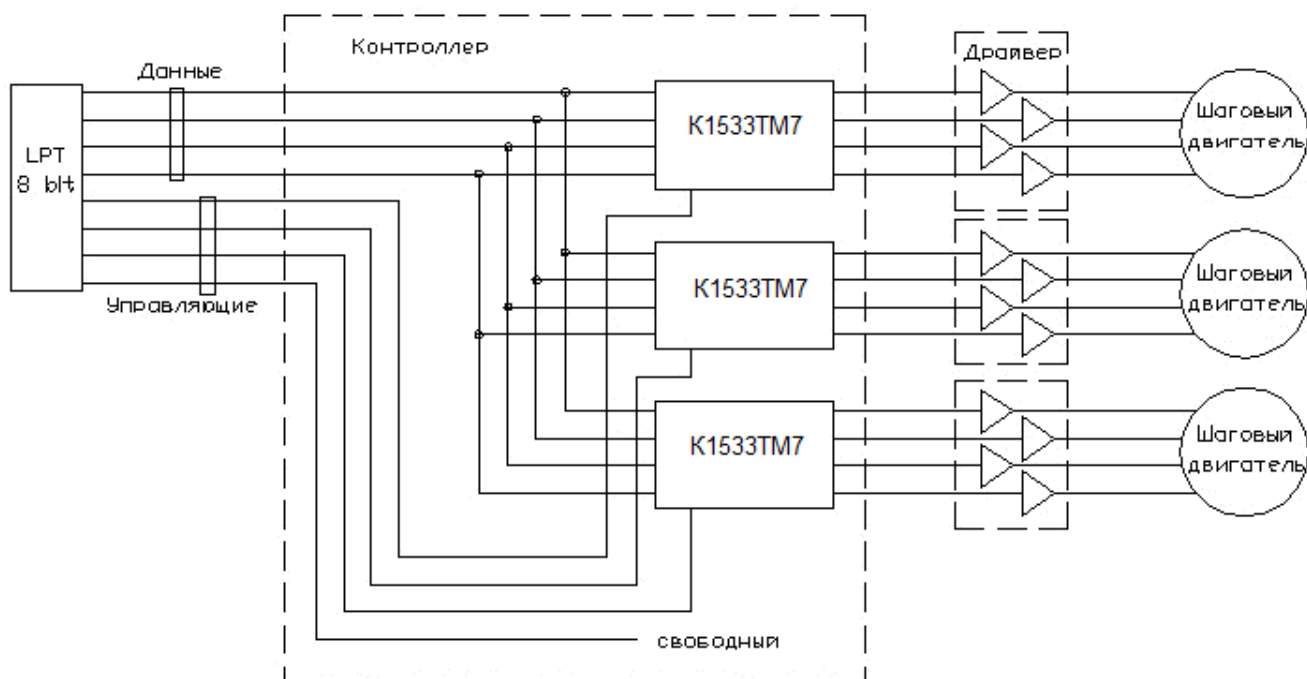


Рис. 3. Структурно-функциональная схема типичной системы управления ШД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батырканов Ж. И., Кадыркулова К. К., Беялов Ш. А. Управление шаговым приводом 3D-принтера: математическая модель и вопросы технической реализации // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 1 (33). – С. 128–138.
2. Большаков В., Бочков А. и др. Основы 3D-моделирования. – СПб.: Питер, 2012. – 304 с.
3. Карпенко Б. К., Ларченко В. И., Прокофьев Ю. А. Шаговые электродвигатели. – Киев: Техніка, 1972. – 216 с.

БАТЫРКАНОВ Ж. И., КУДАКЕЕВА Г. М., СУБАНКУЛОВА Ж. Ж.
ПОДХОД К РАСПОЗНАВАНИЮ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВ
НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННЫХ ОБРАЗОВ И ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Рассматривается и решается задача распознавания зрительных образов. При этом под образом понимается конкретное проявление распознаваемого объекта. Предлагается подход к распознаванию зрительных образов на основе использования базы эталонных образов и процедуры обучения. Предлагаемый подход можно применять для распознавания рукописного текста, идентификации личности по биометрическим данным и решения других подобных задач.

Ключевые слова: образ, объект распознавания, цифровой образ, эталонный образ, считывающее устройство.

BATYRKANOV ZH. I., KUDAKEEVA G. M., SUBANKULOVA ZH. ZH.
RECOGNITION OF VISUAL IMAGES:
AN APPROACH BASED ON REFERENCE IMAGES AND TRAINING

Abstract. The problem of recognition of visual images is considered and solved. The image is thought of as the concrete manifestation of the recognized object. The authors suggest an approach to recognizing visual images based on the use of reference image base and training procedure. This approach can be used to recognize handwritten text, to identify a person by biometric data, etc.

Keywords: image, object of recognition, digital image, reference image, reader.

Введение. В практике сегодняшнего дня достаточно часто возникает потребность в разработке методов, алгоритмов и программ для распознавания зрительных образов. Они применяются для распознавания рукописного текста, природных и техногенных катастрофических явлений по аэрофотоснимкам, при разведке полезных ископаемых, для идентификации личностей по биометрическим данным и пр.

Существуют различные подходы и методы распознавания зрительных образов: распознавание на основе оценок определяющих признаков, распознавание на основе аналогий, распознавание на основе обучения и использования эталонных образов. Среди этих подходов наиболее универсальным и эффективным, на наш взгляд, является подход на основе использования эталонных образов и обучения. Ниже предлагается подход к решению задач распознавания рукописного текста и идентификации личности по биометрическим данным.

Подход на основе базы эталонных образов и обучения. Подход состоит в последовательном выполнении двух этапов:

- 1) зрительный образ предъявляется считывающему устройству;
- 2) считывающее устройство переводит зрительный образ в двоичный компьютерный образ.

В качестве считывающего устройства может служить сканирующее устройство, цифровой фотоаппарат, смартфон, рецепторная матрица и другие специальные устройства. Алгоритм распознавания заключается в последовательном сравнении поступившего двоичного образа со всеми двоичными образами из базы эталонных образов. При сравнении вычисляются количественные оценки близости, например, по евклидовой разности сравниваемых двоичных образов. Тот эталонный двоичный образ, для которого вычисляемая величина евклидовой разности минимальна, определит класс объекта, к которому принадлежит предъявленный для распознавания образ.

При распознавании рукописного текста алгоритм распознавания состоит в распознавании букв предъявленного слова, а затем в сборке распознанных букв в слово, которое затем ищется в словаре (существующей базе данных). Алгоритм распознавания личности по биометрическим данным осуществляется по аналогичной схеме.

Процедура обучения при применении данного подхода к распознаванию состоит в корректировке алгоритма распознавания на этапе разработки и обучения системы. Рассмотрим как это делается на примере распознавания зрительных образов.

Процедура подготовки и обучения системы. В самом начале последовательно на рецепторную матрицу считывающего устройства подается определенное количество образов первого объекта А. При предъявлении конкретного образа A^1 активируются определенные ячейки рецепторной матрицы. Активацию ячеек матрицы можно представить в виде конкретной числовой матрицы, при этом размер числовой матрицы определяется размером рецепторной матрицы. Имеем числовую матрицу типа

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1, \dots, a_{1N}^1 \\ a_{21}^1 & a_{22}^1, \dots, a_{2N}^1 \\ a_{M1}^1 & a_{M2}^1, \dots, a_{MN}^1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $a_{ij}^1 = \begin{cases} 0, \\ 1. \end{cases}$

Далее предъявляется образ A^2 объекта А и так до последнего возможного образа A^L объекта А. Совокупность образов A^1, A^2, \dots, A^L объекта А записывается в память компьютера как база данных эталонных образов объекта А. Эта процедура повторяется для всех объектов

(В... С). В итоге в компьютере создается база данных эталонных образов объектов А, В,..., С:

$$\begin{aligned} A &= \{A^1, A^2, \dots, A^L\}, \\ B &= \{B^1, B^2, \dots, B^P\}, \\ C &= \{C^1, C^2, \dots, C^M\}. \end{aligned} \quad (2)$$

После этапа обучения система готова к распознаванию предъявленных образов.

Алгоритмы распознавания.

Предлагается два варианта алгоритма распознавания.

1-й вариант алгоритма распознавания.

Процедура классификации, т.е. отнесения предъявленного образа к тому или иному объекту происходит по следующей схеме. При предъявлении рецепторной матрицы образа X в компьютере образуется числовой образ в виде матрицы:

$$x = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12}, \dots, X_{1N} \\ X_{21} & X_{22}, \dots, X_{2N} \\ \dots & \dots \\ X_{M1} & X_{M2}, \dots, X_{MN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Чтобы отнести образ X к тому или иному классу объектов А, В... С, осуществляется процедура последовательного вычисления нормы от разностей матрицы X со всеми матрицами $A^1, A^2, \dots, A^L, B^1, \dots, C^1, \dots, C^M$, которые хранятся в базе эталонных образов объектов А, В, ... С. Норму вычислять удобно в виде евклидовой нормы разностей матрицы (1), (2), (3) в виде

$$\|X - A^K\| = \left(\sum_i \sum_j (X_{ij} - a_{ij}^K)^2 \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Среди этого множества (4) существует одна минимальная норма. Пусть, например, минимальная норма разностей будет для образа B^s

$$\|X - B^s\| = \left(\sum_i \sum_j (X_{ij} - b_{ij}^s)^2 \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Тогда компьютер активирует выход В выходного слоя. Это говорит о том, что предъявленный образ X относится к объекту В.

Описанный алгоритм классификации (распознавания) работает не только в случаях, когда матрица X полностью совпадает с матрицами A^1, \dots, C^M , но и в тех случаях, когда X не совпадает ни с одной из них. При этом используется «принцип близости», который в теории распознавания заключается в том, что образы для одного и того же объекта в пространстве признаков должны располагаться близко друг к другу.

2-й вариант алгоритма распознавания.

При использовании этого алгоритма все матрицы $A^1, A^2, \dots, A^L B^1 \dots C^1 \dots C^M, X$ переводятся в векторную форму:

$$\bar{X} = (X_{11}, X_{12} \dots X_{1N}, X_{21}, \dots, X_{2N}, \dots X_{M1}, \dots X_{MN})^T.$$

Далее осуществляется вычисление скалярных произведений вектора \bar{X} со всеми векторами $\bar{A}^1, \dots, \bar{C}^M$.

Скалярное произведение вектора изображения \bar{X} на векторы эталонов $\bar{A}^1, \dots, \bar{C}^M$ характеризует их сходство, при этом изображение X относят к тому классу эталонов, для которого одно скалярное произведение среди $(\bar{X}, \bar{A}^1) \dots (\bar{X}, \bar{C}^M)$ дало максимальное значение.

Таким образом, нами предложен подход распознавания зрительных образов с процедурой обучения и использования базы эталонных образов. Для более точной и достоверной работы распознающего устройства необходимо увеличивать количество ячеек рецепторной матрицы, а также базу эталонных образов распознаваемых объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хант Э. Искусственный интеллект. – М.: Мир, 1978. – 558 с.
2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс Neural Networks: A Comprehensive Foundation. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
3. Журавлев Ю. И. Избранные научные труды. – М.: Магистр, 2002. – 420 с.
4. Батырканов Ж. И. Системы искусственного интеллекта. – Бишкек: ИЦ «Техник», 2013. – 138 с.
5. Батырканов Ж. И., Кудакеева Г. М. Подход к распознаванию зрительных образов на основе эталонов и обучения // Известия Кыргызск. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2015. – №1 (34). – С. 11–13.

ДЖОЛДОШОВ Б. О., САРТОВ Т. Э., ТЕМИРКУЛОВА Н. Т.

**ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
ГИДРОГЕНЕРАТОРА С УЧЕТОМ ВОЗМУЩЕНИЙ**

Аннотация. Рассматривается задача управления объектом в условиях неконтролируемых внешних воздействий. Целью управления является обеспечение заданных границ выходов системы автоматического управления.

Ключевые слова: гидрогенератор, регулятор, синтез систем автоматического управления.

DZOLDOSHOV B. O., SARTOV T. E., TEMIRKULOVA N. T.

**DYNAMIC DESIGN OF HYDROGENERATOR CONTROL DEVICE
UNDER EXTERNAL INFLUENCES**

Abstract. The problem of an object control under uncontrolled external influences is considered. The purpose of the control is to provide the specified limits of the outputs of the automatic control system.

Keywords: hydrogenerator, regulator, synthesis of automatic control system.

Введение. Проблемы эффективного управления агрегатами (и генераторами) являются весьма актуальными, чрезвычайно сложными и практически недоступными для существующих в энергетике методов и подходов автоматического управления. В настоящее время возникла необходимость в разработке новых методов и алгоритмов управления, которые обеспечивали бы надежную генерацию электроэнергии нужного качества с одновременной минимизацией ее себестоимости. Для эффективного управления гидроагрегатами необходимо рассматривать их нелинейные модели с учётом неопределенных и неконтролируемых внешних возмущений и проводить синтез и проектирование САУ (систем автоматического управления) совершенно новыми методами и алгоритмами, которые в наиболее полной мере позволят учесть явления взаимосвязанности и нелинейности процессов.

Физическую сущность многих современных технических систем, в том числе и генераторов энергосистем, составляют колебательные процессы. Колебательные режимы могут быть как полезными, так и вредными. В отношении генераторов крайне нежелательными колебательными режимами являются самораскачивание и самовозбуждение, т.к. они приводят к возникновению нарастающих незатухающих колебаний, т.е. к нарушению устойчивости. Особенно важным случаем являются внешние низкочастотные гармонические возмущения, действующие на генераторы со стороны

энергосистемы. Возмущения со стороны электроэнергетической системы (ЭЭС) способствуют появлению системных колебаний, что, в свою очередь, может привести к нарушению устойчивости ЭЭС, асинхронному ходу и развитию системной аварии [1; 4].

Математическая модель объекта управления. Математическая модель гидроагрегата, работающего на систему неограниченной мощности в пространстве состояний, описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в виде [1; 3; 4]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3x_4 + b_{11}U_\infty \sin(x_5) + b_{12}u_1 + \xi_1; \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3x_4 + b_{21}U_\infty \sin(x_5) + b_{22}u_1 + \xi_1; \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1x_4 + a_{32}x_2x_4 + a_{33}x_3 + b_{31}U_\infty \cos(x_5) + \xi_1; \\ \dot{x}_4 = a_{41}(x_6 + a_{42}x_1x_3 - (a_{43}x_1 + a_{44}x_2)x_3 - Dx_4) + \xi_2; \\ \dot{x}_5 = x_4 - \omega_{nom}; \\ \dot{x}_6 = 2/T_\omega(-x_6 - x_7 - T_\omega(1/T_s)(-x_7 + m_0 + u_2)); \\ \dot{x}_7 = (1/T_s)(-x_7 + m_0 + u_2); \\ \dot{x}_8 = \xi_2; \\ \dot{x}_9 = s * \xi_1. \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициенты дифференциального уравнения объекта управления, связанные с параметрами статора и ротора синхронного генератора [1]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -(r+R_e)/C; a_{12} = (kM_f r_f)/(L_f C); a_{13} = (L_e - L_q)/C; b_{11} = 1/C; b_{12} = kM_f/(L_f C); \\ a_{21} &= -kM_f(R_e + r)/(L_d B); a_{22} = -r_f/B; a_{23} = -kM_f(L_e + L_q)/(L_d B); b_{21} = -kM_f/(L_d B); \\ b_{22} &= -1/B; a_{31} = -(L_e + L_q)/L_q; a_{32} = -kM_f/L_q; a_{33} = -(r + R_e)/L_q; b_{31} = -1/L_d; \\ a_{41} &= 1/H; a_{42} = L_q/H; a_{43} = L_d/H; a_{44} = kM_f/H; a_{61} = -2/T_\omega; a_{62} = 2/T_s - 2/T_\omega; \\ a_{62} &= 2/T_s - 2/T_\omega; b_{61} = -2m_0/T_s; b_{62} = -2/T_s; a_{71} = -1/T_s; a_{72} = m_0/T_s; b_{72} = 1/T_s. \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} C &= 0,3417; B = -0,3627; a_{11} = -2,4926; a_{12} = 9,7561 \times 10^{-4}; a_{13} = -1,0039; b_{11} = 2,9268; \\ b_{12} &= 2,4390; a_{21} = 2,0772; a_{22} = 0,0011; a_{23} = 3,4073; b_{21} = 2,439; b_{22} = 2,7572; a_{31} = -1,6057; \\ a_{32} &= 1,3218; a_{33} = -0,9789; b_{31} = -1,1494, \end{aligned}$$

где:

$$\begin{aligned} L_d &= 1,3; L_q = 0,87; r = 0,00165; L_f = 1,38; r_f = 0,0004; kM_f = 1,15; H = 5; T_\omega = 4; T_s = 1; \\ m_0 &= 0,5; \omega_{nom} = 1; D = 1; R_e = 0,85; L_e = 0,527; U_\infty = 1; K = \sqrt{3}U_\infty. \end{aligned}$$

Нелинейная вектор-функция $F(x)$, матрица управления B , а также вектор неопределённых возмущений имеют вид:

$$\begin{aligned} F(x) &= [F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_9)]^T, \quad B = [b_{12} \ 0; b_{22} \ 0; 0 \ 0; 0 \ 0; 0 \ 0; 0 \ b_{62}; 0 \ b_{72}; 0 \ 0; 0 \ 0]; \\ \xi &= \xi(t) = [\xi_1; \xi_1; \xi_1; \xi_2; 0; 0; 0; \xi_2; s^* \xi_1], \\ F_1(x) &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3x_4 + b_{11}U_\infty \sin(x_5), \quad F_2(x) = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3x_4 + b_{21}U_\infty \sin(x_5), \\ F_3(x) &= a_{31}x_1x_4 + a_{32}x_2x_4 + a_{33}x_3 + b_{31}U_\infty \cos(x_5), \quad F_4(x) = a_{41}(x_6 + a_{42}x_1x_3 - (a_{43}x_1 + a_{44}x_2)x_3 - Dx_4), \\ F_5(x) &= x_4 - \omega_{nom}, \quad F_6(x) = 2/T_\omega(-x_6 - x_7 - T_\omega(1/T_s)(-x_7 + m_0 + u_2)), \\ F_7(x) &= (1/T_s)(-x_7 + m_0 + u_2), \quad F_8(x) = 0; F_9(x) = 0. \end{aligned}$$

где: $s = (x_4 - \omega_{nom}) / \omega_{nom}$ – скольжение, переменные вектора состояния;
 $x_1 = x_1(t) = I_d(t)$, $x_3 = x_3(t) = I_q(t)$ – токи статора по продольным и поперечным осям d, q , соответственно; $x_2 = x_2(t) = I_f(t)$ – ток возбуждения ротора; $x_4 = x_4(t) = \omega(t)$, $x_5 = x_5(t) = \delta(t)$ – частота вращения ротора и электрический угол; $x_6 = x_6(t) = P_t(t)$ – механическая мощность на валу генератора; $x_7 = x_7(t) = m(t)$ – величина открытия водяного шлюза; $x_8 = \xi_1 = \xi_1(t)$, $x_9 = \xi_2 = \xi_2(t)$ – переменные состояния модели возмущений; $u_1 = U_f = U_f(t)$ – напряжение возбуждения ротора (управления синхронного генератора); $u_2 = U_l = U_l(t)$ – перемещение сервопривода (управление гидротурбиной); D – демпферный коэффициент [1].
 Выберем $D=1$; $x = [x_1, x_2, \dots, x_9]^T = [i_d, i_f, i_q, \omega, \delta, P_m, m, \xi_1, \xi_2]^T$ – вектор переменных состояния, характеризующих токи по соответствующим обмоткам генератора.

Постановка задачи. Рассмотрим объект управления, описываемый векторно-матричным дифференциальным уравнением в пространстве состояний

$$\dot{x}(t) = F(x) + Bu(t) + \xi(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad (2)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния объекта; $u \in R^m$ – вектор управления;
 $F(x) = \{F_i(x)\} \in R^n$ – нелинейная вектор-функция; $B = \{b_{iv}\} \in R^{n \times m}$ – вещественная матрица;
 t_0, t_k – начальный и конечный моменты управления; $R^n - n$ -мерное векторное арифметическое пространство. Будем предполагать, что вектор возмущения $\xi(t)$ не определен и не измеряется.

Требуется определить алгоритм управления $u = u(x, t)$ объектом, состояния которого описываются векторным дифференциальным уравнением (2), обеспечивающим выполнение требования к качеству процессов управления:

$$|x_i(t)| \leq \bar{\sigma}_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Метод синтеза САУ (построение алгоритмов управления). Решение сформулированной задачи синтеза будем осуществлять на основе подхода критерия допустимости управления [4; 5]. В соответствии с этим подходом для гарантированного обеспечения критериальных ограничений (3) достаточно выполнения неравенств

$$\int_{t_0}^t x_i(\tau) \cdot \dot{x}_i(\tau) d\tau \leq \int_{t_0}^t \bar{\sigma}_i(\tau) \cdot \dot{\bar{\sigma}}_i(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k]. \quad (4)$$

В целях использования соотношений (4) для синтеза необходимого закона управления $u(t)$ уравнение объекта (2) представим в координатной форме:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n F_j(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} u_\ell(t) + \xi_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

С учетом уравнений (5) соотношения (4) имеют вид:

$$\int_{t_0}^t x_i(\tau) \left(\sum_{j=1}^n F_j(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} u_\ell(\tau) + \xi_i(\tau) \right) d\tau \leq \Gamma_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где $\Gamma_i(t) = \int_{t_0}^t \bar{\sigma}_i(\tau) \dot{\bar{\sigma}}_i(\tau) d\tau.$

Пусть каждая координата вектора управляющих воздействий $u(t)$ состоит из двух частей:

$$u_\ell(t) = \hat{u}_\ell(t) + \tilde{u}_\ell(t), \quad \ell = \overline{1, m}. \quad (7)$$

Для определения компонентов управления составим соотношения вида

$$\sum_{i=1}^n F_i(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} \hat{u}_\ell = \gamma_i x_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Введем обозначения

$$Z_i(t) = \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} \tilde{u}_\ell(t) + \xi_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Для определения компонентов управления $\tilde{u}_\ell(t)$ положим, что

$$\dot{Z}_i(t) = \alpha_i^{-1} x_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

С учетом соотношений (8), (9) и (10) неравенства (6) преобразуются к виду

$$\gamma_i \int_{t_0}^t x_i^2(\tau) d\tau + \alpha_i \int_{t_0}^t Z_i(\tau) \dot{Z}_i(\tau) d\tau \leq \Gamma_i(t). \quad (11)$$

Можно показать, что $\frac{Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)}{2} = \int_{t_0}^t Z_i(\tau) \cdot \dot{Z}_i(\tau) d\tau$.

В результате условия (11) запишутся в виде

$$\gamma_i \int_{t_0}^t x_i^2(\tau) d\tau + \alpha_i [Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)] \leq \Gamma_i(t). \quad (12)$$

Определим параметры γ_i, α_i . Легко показать, что при касании кривой функций $x_i(t)$ на верхней $\bar{b}_i(t)$ и нижней $-\bar{b}_i(t)$ границах, внутри которых должен находиться переходный процесс $x_i(t)$, должны выполняться неравенства

$$\gamma_i \int_{t_0}^t \sigma_i^2(\tau) d\tau + \alpha_i [Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)] \leq \Gamma_i(t), \quad i = \overline{1, n},$$

что эквивалентно условиям

$$\alpha_i [Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)] \leq \Gamma_i(t) - \gamma_i \int_{t_0}^t \sigma_i^2(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Отсюда видно, что если параметры γ_i выбрать так, чтобы правые части соотношений (13) принимали положительные значения, а параметры α_i задать так, чтобы левые части неравенств (10) были отрицательными, то условия допустимого качества управления (4) будут выполняться для всех $t \in [t_0, t_k]$. Таким образом, параметры γ_i определяются из условия

$$\int_{t_0}^t \bar{b}_i(\tau) \cdot \dot{\bar{b}}_i(\tau) d\tau - \gamma_i \int_{t_0}^t \bar{b}_i^2(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

В последнем случае

$$\alpha_i = \begin{cases} \alpha_{i1}, & \text{если } Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0) \leq 0, \\ \alpha_{i2}, & \text{если } Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0) > 0, \end{cases}$$

где вещественные числа α_i функций $Z_i(t)$ определяются как решения уравнений (10). При выборе $Z_i(t) = 0$, очевидно, что $Z_i^2(t) \geq 0$, что облегчает определение параметров α_i . При этом необходимо, чтобы $\alpha_i \leq 0$.

Таким образом, выбор параметров $\gamma_i, \alpha_i, i = \overline{1, n}$, определяет качество управления (4).

Поэтому из уравнений (8) определяем первую составляющую вектора управления $\hat{u} \in R^m$:

$$B\hat{u}(t) = \gamma \cdot x(t) - F(x), \quad (15)$$

где матрица $\gamma = \text{diag} \{ \gamma_i \}_{i=1}^n$. Отсюда получаем, что

$$\dot{\hat{u}}(t) = G(\gamma \cdot x(t) - F(x)), \quad \text{где } G = (B^T B)^{-1} B^T. \quad (16)$$

Здесь предполагается, что существует обратная матрица $\det(B) \neq 0$.

Далее с учетом условий (8) и соотношений (9) имеем, что

$$\sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} \ddot{u}_\ell(t) + \dot{\xi}_i(t) = \alpha_i^{-1} x_i(t), \quad i = \overline{1, n},$$

или в векторной форме $B \cdot \ddot{\hat{u}}(t) = \alpha \cdot x(t) - \dot{\xi}(t)$, $i = \overline{1, n}$, где матрица $\alpha = \{ \alpha_i \}_{i=1}^n$.

Из векторного уравнения определяем закон изменения второй составляющей закона управления $\ddot{u}(t)$:

$$\ddot{\hat{u}}(t) = G \cdot (\alpha^{-1} \cdot x(t) - \dot{\xi}(t)), \quad (17)$$

В результате для объекта (2) вектор управления

$$u(t) = \hat{u}(t) + \ddot{u}(t), \quad (18)$$

обеспечивающий выполнение условий заданного качества замкнутой системы, определяется на основе соотношений (16) и (17).

Алгоритм управления гидрогенератором. Алгоритм управления объектом (т.е. динамика синтезированного закона управления) согласно (6), (7) и (8) имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} du_1 / dt = [1 / (b_{12}^2 + b_{22}^2) b_{12} (g_{11} \dot{x}_1 - a_{11} \dot{x}_1 - a_{12} \dot{x}_2 - a_{13} \dot{x}_3 \dot{x}_4 - b_{11} U_\infty \cos(x_5) \dot{x}_5) + \\ \quad + 1 / (b_{12}^2 + b_{22}^2) b_{22} (g_{22} \dot{x}_2 - a_{21} \dot{x}_1 - a_{22} \dot{x}_2 - a_{23} \dot{x}_3 \dot{x}_4 - b_{21} U_\infty \cos(x_5) \dot{x}_5) + \\ \quad + 1 / (b_{12}^2 + b_{22}^2) b_{12} / \alpha_{11} x_1 + 1 / (b_{12}^2 + b_{22}^2) b_{12} / \alpha_{22} x_2], \\ du_2 / dt = [1 / (b_{62}^2 + b_{72}^2) b_{62} (g_{66} \dot{x}_6 - a_{61} \dot{x}_6 - a_{62} \dot{x}_7 + 1 / (b_{62}^2 + b_{72}^2) b_{72} (g_{77} \dot{x}_7 - a_{71} \dot{x}_7) + \\ \quad + 1 / (b_{62}^2 + b_{72}^2) b_{62} / \alpha_{66} x_6 + 1 / (b_{62}^2 + b_{72}^2) b_{72} / \alpha_{77} x_7]; \end{array} \right. \quad (19)$$

где U_∞ – действующее значение напряжения.

Переходные процессы САУ. Далее на рисунках 1, 2, 3, 4 приведены полученные переходные процессы САУ при следующих параметрах настройки законов управления (19):

$$\alpha_{11} = -1; \quad g_{11} = -1; \quad \alpha_{ii} = \alpha_{11}; \quad g_{ii} = g_{11}; \quad i = \overline{2, 11}.$$

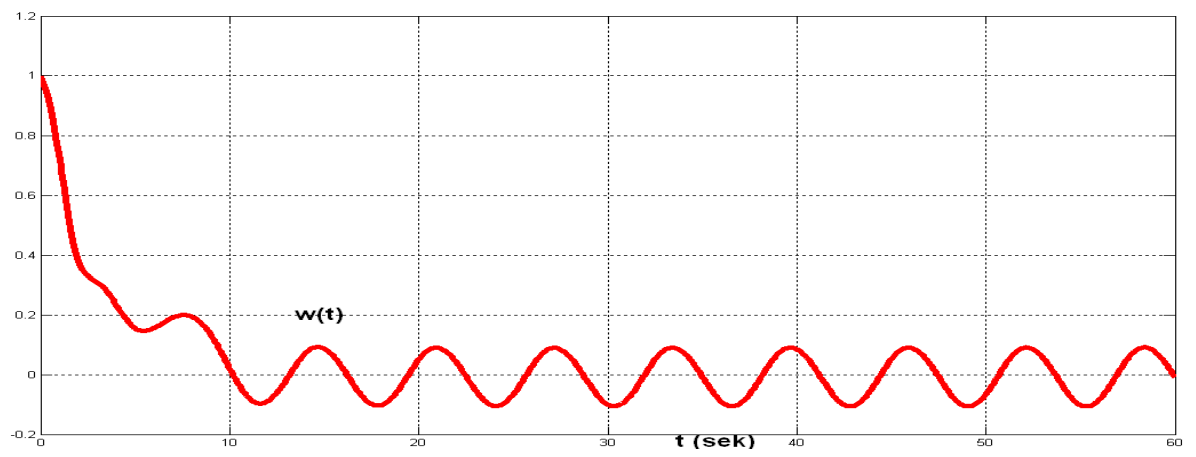


Рис. 1. Угловая скорость вращения ротора $\omega(t)$

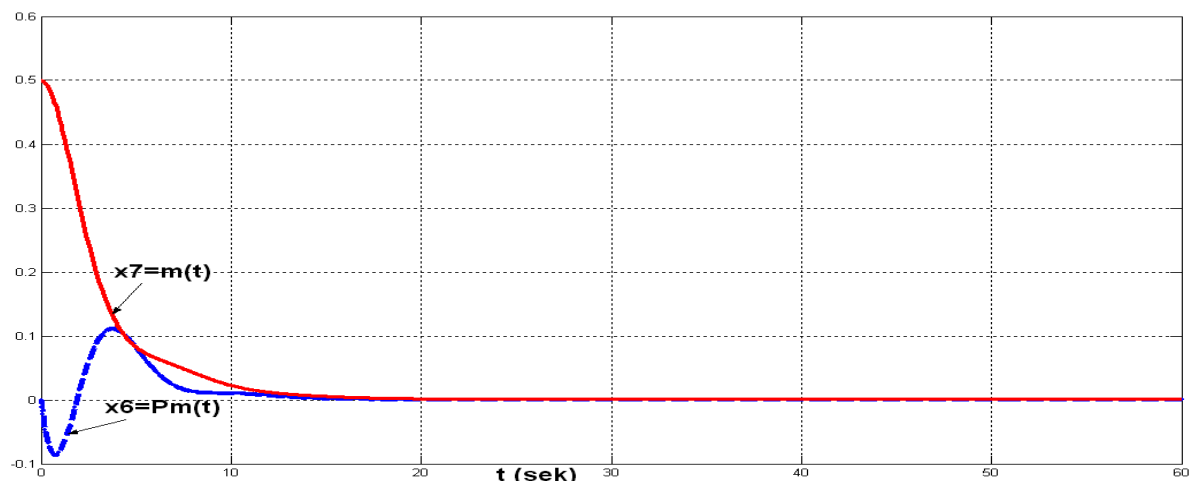


Рис. 2. Величина открытия водяного шлюза $m(t) = x_7(t)$
и механическая мощность на валу СГ $P_m(t) = x_6(t)$.

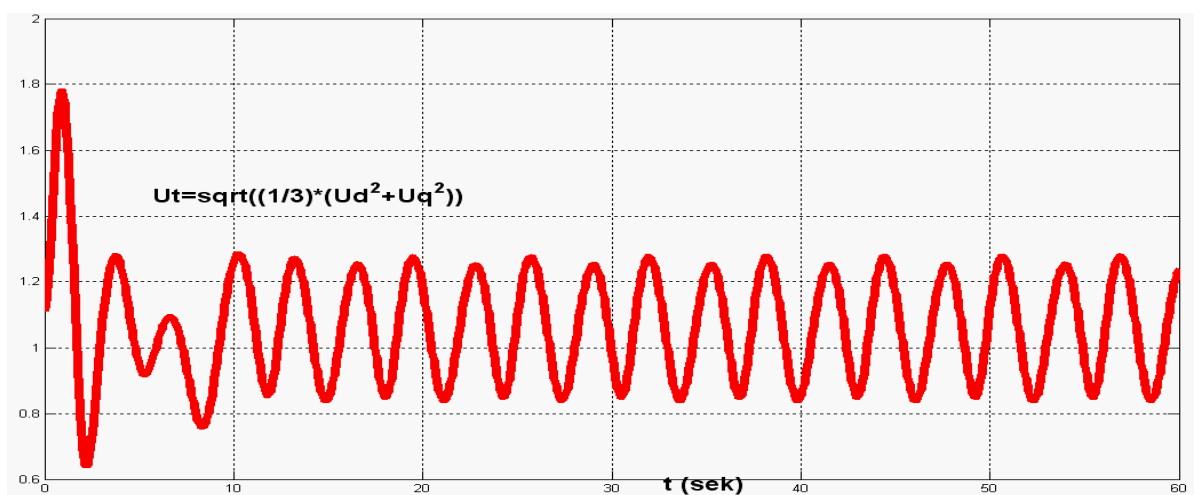


Рис. 3. Напряжение на шине синхронного генератора $U_t(t)$

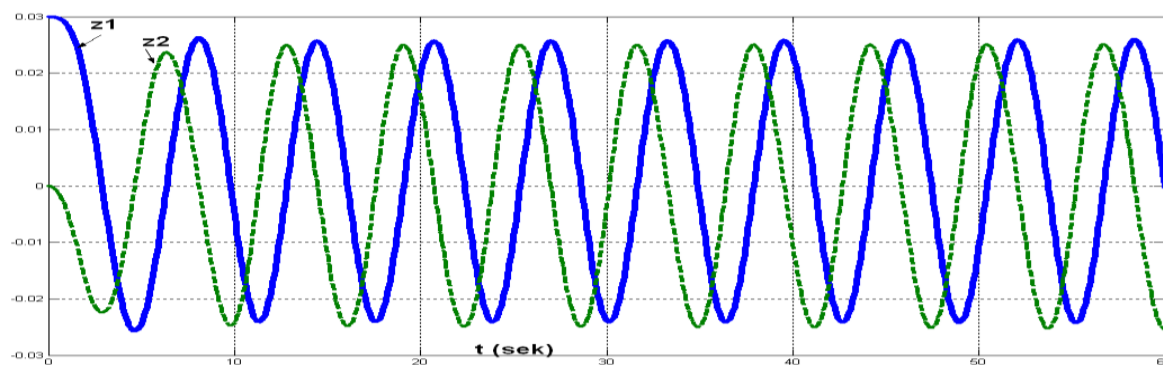


Рис. 4. Переменные модели возмущений.

Выводы. Разработан новый метод синтеза законов управления частотой и мощностью гидрогенератора и их групп в нелинейной постановке с учетом явлений взаимосвязанности, многомерности, нелинейности и с учетом неопределенных возмущений. На основе предложенного закона (алгоритмов) управления построены принципиально новые классы автоматических регуляторов, обеспечивающие асимптотическую устойчивость замкнутых САУ («гидрогенератор + регулятор») и инвариантность к внешним возмущениям. Регуляторы, построенные по предлагаемым подходам, существенно превосходят по своим динамическим свойствам существующие типовые регуляторы, базирующиеся на идеологии линейной теории управления. Результаты компьютерного моделирования показали эффективность построенных регуляторов. В дальнейшем внедрение регуляторов в практику управления генераторами (энергоблоков) позволит принципиально улучшить статические и динамические свойства энергосистем в аварийных и экстремальных режимах их работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
2. Джолдошев Б. О. Разработка методов и алгоритмов управления многомерными системами по заданным инженерным показателям качества. – Бишкек: Илим, 2011. – 166 с.
3. Джолдошев Б. О., Темиркулова Н. Т. Динамическое проектирование адаптивного регулятора электроэнергетической системы // Изв. КГТУ им. И. Раззакова. – 2016. – № 39, Т. 2. – С. 87–95.
4. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы. – М.: Едиториал, УРСС, 2005. – 222 с.
5. Biryukow V. F., Dzholdoshev B. O. Inequality method in a single problem of synthesis of adaptive control // Evaluation of adaptive control strategies, IFAC Workshop Series. Oxford. – 1989. – No.7. – pp. 137–142.

БЕСПАЛОВ Н. Н., ЕВИШЕВ А. В., ЗОРЬКИН А. В., ИЛЬИН М. В., КАПИТОНОВ С. С.
ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Аннотация. В статье описан принцип построения диагностического оборудования для выявления потенциально ненадежных или вышедших из строя силовых полупроводниковых приборов в групповой последовательной цепи. Рассмотрены основные блоки и описаны принципы их работы. Представлены преимущества использования дистанционной диагностики.

Ключевые слова: преобразователь, дистанционное управление, силовой полупроводниковый прибор, информативный параметр, диагностика группового последовательного соединения.

BESPALOV N. N., EVISHEV A. V., ZORKIN A. V., ILYIN M. V., KAPITONOV S. S.
REMOTE MONITORING SEMICONDUCTOR UNITS
OF POWER ELECTRONIC DEVICES

Abstract. This article describes the principle of constructing diagnostic equipment for detecting potentially unreliable or failed semiconductor power devices in a group series circuit. The main blocks and their operating principles are described. The advantages of using remote diagnostics are considered.

Keywords: converter, remote control, semiconductor power device, informative parameter, diagnostics of group serial connection.

В настоящее время современные силовые преобразователи электрической энергии реализуются на основе силовых полупроводниковых приборов (СПП), соединяющихся в виде групповых последовательных цепей (ГПЦ). В ходе эксплуатации все СПП подвергаются электрическим и тепловым перегрузкам, что обуславливает возникновение в них процессов старения и деградации, в результате которых на определенном этапе жизненного цикла часть СПП отказывает катастрофически или от изменения величин параметров [1; 3; 5]. В связи с этим для выявления потенциально ненадежных, а также уже отказавших приборов периодически проводится диагностика и контроль СПП с последующим ремонтом преобразователей. Данные операции сложны и затратны, а также требуют высокой квалификации обслуживающего персонала и применения сложной и высокоточной диагностической аппаратуры. При этом современные методы диагностики СПП требуют предварительного полного их демонтажа из преобразователя, проведения испытаний и дальнейшего монтажа в преобразователь. Это обусловлено отсутствием

методов и аппаратуры для диагностики состояния СПП в составе преобразователя. В этой связи в настоящее время остается актуальной проблема выявления вышедших из строя полупроводниковых приборов в не демонтированных силовых преобразователях. Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время диагностика состояния СПП в составе групповых последовательных цепей преобразователей практически отсутствует [2; 4; 6; 7].

Создание устройства, позволяющего проводить диагностику СПП в преобразователе, отключив лишь ГПЦ от силовой линии в месте его работы, с дистанционным контролем и управлением устройством, позволит:

- обеспечить безопасность проведения диагностики;
- повысить производительность технического обслуживания;
- существенно снизить затраты энергии при испытании;
- свести к минимуму функции работника при контроле состояния приборов;
- избавиться от множества соединительных проводов;
- минимизировать размеры испытательного устройства.

Для выявления потенциально ненадежного СПП в групповой последовательной цепи требуется тщательный контроль по различным информативным параметрам в состоянии низкой проводимости полупроводниковых приборов. Для этого разрабатывается устройство, реализуемое на основе функциональной схемы, представленной на рисунке 1.

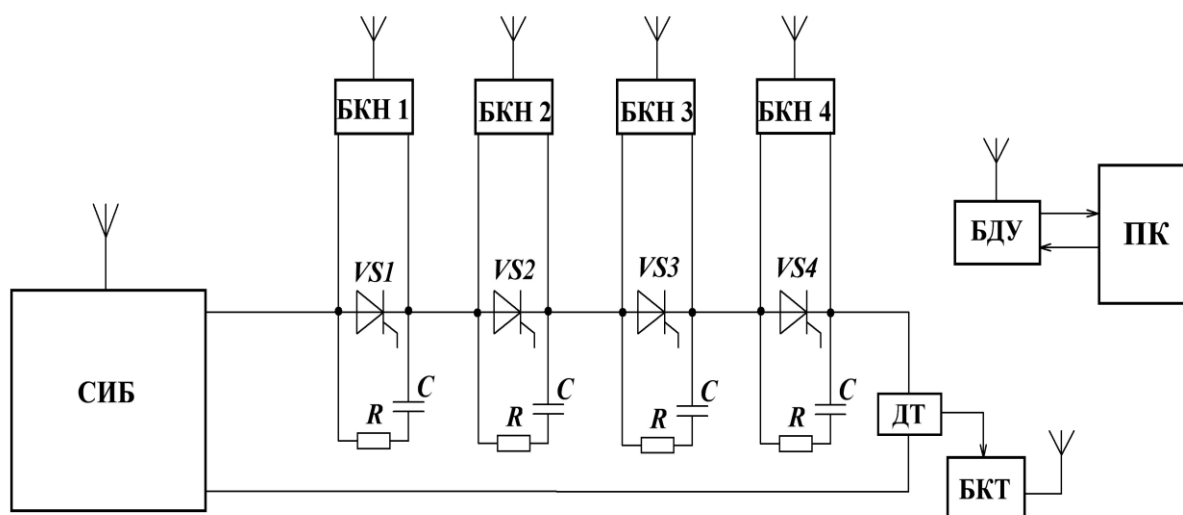


Рис. 1. Функциональная схема диагностического оборудования.

Основные блоки диагностического оборудования включают:

- силовой испытательный блок (СИБ);
- блоки контроля напряжения (БКН1–БКН4);
- блок контроля тока (БКТ);
- блок дистанционного управления (БДУ);
- персональный компьютер (ПК).

СИБ выполняет функцию формирования испытательного импульса напряжения полусинусоидальной формы u_R (рисунок 2) и подачи его на испытуемую цепь группового последовательного соединения VS1–VS4. Процесс диагностики проводится в состоянии низкой проводимости полупроводниковых приборов.

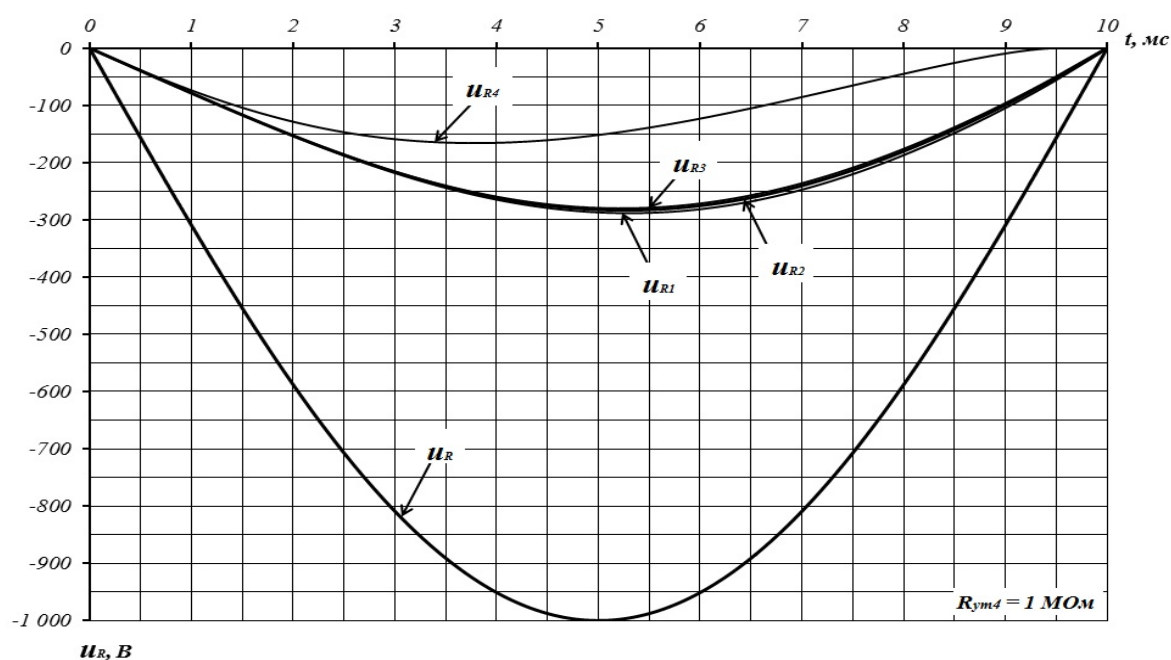


Рис. 2. Временные зависимости обратного напряжения на тиристорах VS1–VS4 в СНП.

БКН1–БКН4 и БКТ, предназначены для считывания величины значения информативного сигнала u_{R1} – u_{R4} (рис. 2) и передачи его по беспроводной сети на БДУ. Блоки контроля выполнены в виде навесных автономных устройств с внутренним питанием. Соответственно энергопотребление в таких устройствах является одним из важных факторов. В связи с этим сеть передачи будет реализована на основе Wi-Fi модулей ESP8266 компании Espressif Systems, так как энергопотребление ESP8266 около 60 μA в режиме глубокого сна (с работающими часами реального времени) и меньше 0,5 mA в режиме поддержания связи с точкой доступа Wi-Fi [4; 8].

БДУ выполняет функцию приемника информативного сигнала с БКН1–БКН4 и БКТ и передачи его на ПК. Также БДУ выступает в качестве управляющего блока, позволяющего по беспроводной сети управлять работой БКН1–БКН4, БКТ и СИБ.

ПК является панелью оператора, с помощью которой можно задавать режимы работы всех блоков диагностического устройства, получить и вывести на экран все информативные параметры о состоянии испытуемой цепи. При наличии всех информативных параметров, оператор, проводящий диагностику, с уверенностью может дать заключение о состоянии СПП в групповой последовательной цепи.

Создание устройства, позволяющего проводить диагностику СПП в преобразователе на месте его работы, с дистанционным выводением всех информативных параметров и дистанционным управлением усовершенствует процесс диагностики по многим факторам. Во-первых, диагностика преобразователя проводится без демонтажа всего устройства, от силовой линии отключается только ГПЦ, что позволит уменьшить временные и финансовые затраты. Во-вторых, процесс диагностики станет более безопасным, так как оператор будет находиться на безопасном расстоянии. В-третьих, блоки устройства имеют малые габариты, а количество соединительных проводов сведено к логическому минимуму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С., Ильин М. В., Евишев А. В., Зорькин А. В. Выявление информативного параметра для определения потенциально ненадежного полупроводникового прибора в групповой последовательной цепи преобразователя // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – Вып. № 2. – С. 43–46.
2. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С., Ильин М. В., Евишев А. В., Зорькин А. В. Исследование процессов в групповом последовательном соединении силовых полупроводниковых приборов в программной среде Multisim // Сборник трудов конференции NI Academic Days 2017. – Москва, 2017. – С. 107–110.
3. Беспалов Н. Н. Причины отказов силовых тиристоров в режимах включения с высокими значениями скорости нарастания тока в открытом состоянии // Силовая электроника. – 2005. – Вып. № 4. – С. 15–17.
4. Беспалов Н. Н., Евишев А. В., Ильин М. В., Капитонов С. С. Исследование процессов, протекающих в цепях с последовательным групповым соединением силовых полупроводниковых приборов при их выключении [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2015. – № 11. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/issledovanie-processov-protekayushhix-v-cepyax-s-posledovatelnyim-gruppovym-soedineniem-silovykh-poluprovodnikovyx-priborov-pri-ix-vyklyuchenii>.

5. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С., Ильин М. В., Евишев А. В. Исследование режимов работы тиристорного преобразователя в электроприводе постоянного тока при вариации значений противо-эдс в нагрузке // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – Вып. № 5. – С. 135–137.
6. Беспалов Н. Н., Евишев А. В. Исследование процессов в силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости при их групповом последовательном соединении // XLIV Огаревские чтения: материалы научной конференции: в 3 ч. / Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева. – Саранск, 2016. – Ч. 1. – С. 127–134.
7. Евишев А. В., Зорькин А. В. Моделирование процессов, протекающих в силовых диодах в состоянии низкой проводимости // Материалы XX научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева: в 3 ч. – Саранск, 2016. – Ч. 1. – С. 57–61.
8. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С., Ильин М. В., Евишев А. В., Зорькин А. В. Моделирование переходного процесса выключения силовых полупроводниковых приборов в программной среде LabVIEW // Сборник трудов конференции NI Academic Days 2017. – Москва, 2017. – С. 114–117.

КОШОЕВА Б. Б., ЛАЙЛИЕВ А. А.

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЕМ ЖИЛОГО ДОМА**

Аннотация. В статье представлена разработка устройства контроля и управления системой электрического отопления на базе современного широко распространенного универсального контроллера Atmega 328 компании Atmel. Основными критериями реализации устройства были простота, низкая стоимость и широкая распространенность применяемых электронных компонентов.

Ключевые слова: микроконтроллерный комплект, блок реле, датчик тока, трубчатые электрические нагреватели.

KOSHOEVA B. B., LAILIEV A. A.

**DEVELOPMENT OF MICROCONTROLLER CONTROL SYSTEM
FOR ELECTRIC HEATING OF RESIDENTIAL BUILDING**

Abstract. The article presents a device, based on the modern widely used universal controller Atmega 328 by Atmel, developed for monitoring and controlling the electric heating system. The main criteria of the device development were simplicity, low cost and wide use of the electronic components.

Keywords: microcontroller set, relay unit, current sensor, tubular heating element.

Одной из самых насущных задач в обыденной жизни каждой семьи является проблема отопления дома в зимний период времени. Рассматривая семейные статьи расходов, напрашивается вывод о том, что отопление занимает значительную долю бюджета средней по доходам семьи, а такие семьи – это подавляющая часть населения любой страны.

Электроотопление является одним из наиболее удобных способов отопления с точки зрения доставки энергоресурсов, их учета и организации управления ими. Так, в Республике Кыргызстан, несмотря на наличие огромных запасов бурого угля, применение его является затруднительным из-за удаленного расположения угольных месторождений в высокогорных регионах страны. В себестоимости этого топлива транспортные расходы занимают более 50%. Учитывая местные условия, правительство Кыргызстана осуществляет государственную финансовую политику, которая ограничивает цену 1 кВт/час электроэнергии для населения в 70 тыйынов (около 1 цента USD) при потреблении до 700 кВт/час в месяц. Однако популярность использования для отопления домов электроэнергии создала проблему перегрузки электрических сетей, созданных относительно давно. Изношенность токоведущих

линий, понижающих трансформаторов и оборудования энергетических предприятий приводит к аварийным ситуациям и частым отключениям, особенно в холодные месяцы. Для устранения данной ситуации были предприняты меры по ограничению текущего потребления для каждого потребителя на уровне 10 кВт. Для этого в домах устанавливаются новые интеллектуальные счетчики электроэнергии с возможностью удаленного управления, которые отключают потребителя от электросети при достижении общего тока потребления в 46 А. Для подключения потребителя вновь к энергосети, даже при снижении нагрузки, необходима некоторая процедура обращения в контролирующие органы в виде уведомления, что занимает некоторое время, иногда более суток. Это доставляет большие неудобства, особенно в зимнее время.

Перед нами была поставлена задача разработки устройства, которое могло бы разделить нагрузку отопления и все остальное бытовое потребление электроэнергии. Основными критериями при реализации данного проекта должны были стать простота, низкая стоимость и доступность комплектующих на рынке.

Основной функцией разработанного в итоге прибора является уменьшение нагрузки электроотопления обратно пропорционально объему бытовой нагрузки в вечернее и утреннее время, когда расходы электроэнергии достигают пиковых значений, а при достижении максимальных значений – ее отключение.

Структурная схема системы микроконтроллерного управления представлена на рисунке 1.

Для обеспечения четырех уровней мощности электроотопления с шагом регулирования 1 200 Вт от 0 до 3 600 Вт в качестве нагревательных элементов были выбраны три трубчатых электрических нагревателя мощностью по 1 200 Вт. Для контролирования текущего общего тока потребления используется датчик тока с максимальным значением тока не менее 50 А.

Для реализации микроконтроллерного управления был выбран широко распространенный модуль Arduino Uno на базе микроконтроллера Atmega 328 производства компании Atmel. В качестве нагрузки использованы теплоэлектронагреватели фирмы Ariston мощностью 1 200 Вт, в качестве датчика тока выбрана плата модуля Arduino ACS 758 производства компании Allegro. Для гальванической развязки управляющих и силовых цепей используется релейный блок Arduino – DSP AVR PIC ARM с четырьмя реле.

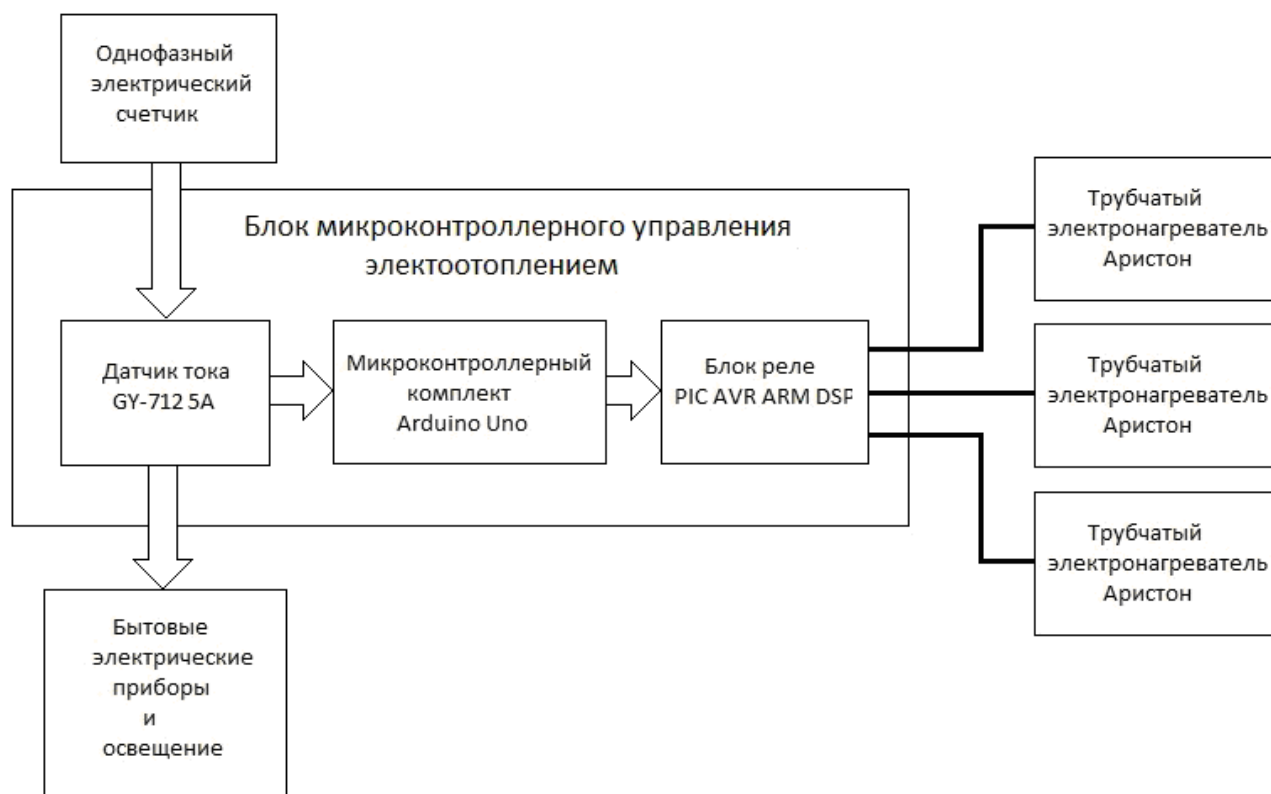


Рис. 1. Структурная схема системы микроконтроллерного управления.

Внешний вид узлов разработанного устройства показан на рисунке 2, а некоторые их параметры представлены в таблице 1.

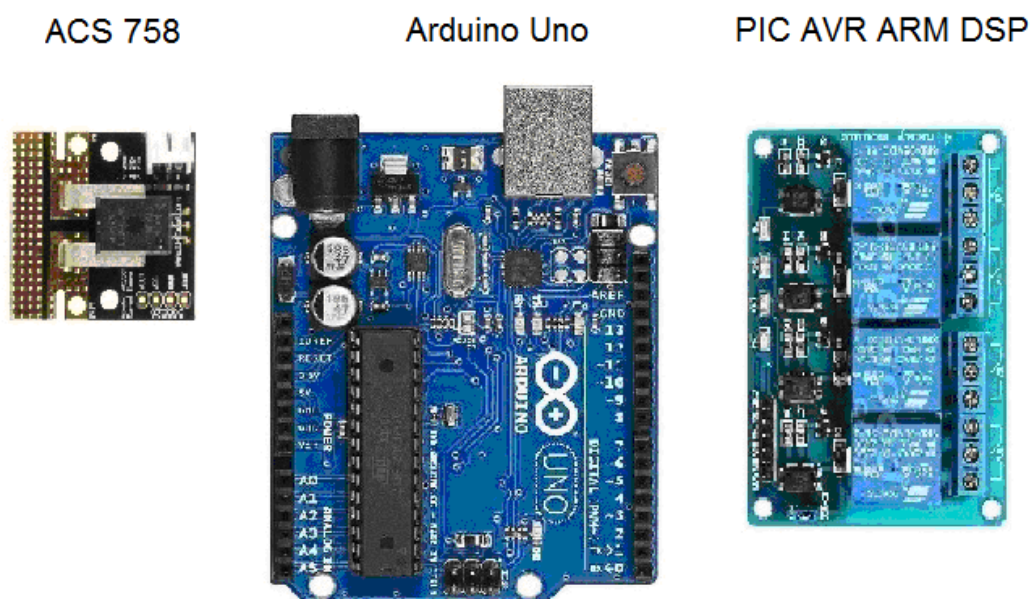


Рис. 2. Внешний вид узлов разработанного устройства.

Основные параметры узлов устройства

Наименование	Напряжение питания, В	Габаритные размеры, см
Arduino Uno	7,5 – 12,0	6,9 × 5,3
Модуль реле DSP AVR PIC ARM	5	7,2 × 5,2
Датчик тока ACS758 (50 А)	5	3,4 × 3,4

Благодаря модульной конструкции и наличию встроенных клемм для электрических клемм устройство легко собирается. Все комплектующие свободно продаются как в специализированных магазинах электроники, так и в интернет-магазинах. Они недороги – общая стоимость элементов не превышает 3 000 сом (около 50 USD). Небольшие габариты устройства позволяют его легко встраивать в уже существующую систему электроснабжения дома. При применении других моделей производственной линейки Arduino, таких как Arduino Nano либо Arduino Pro mini, устройство можно сделать еще меньшего размера.

Наличие шести аналоговых входов и четырнадцати цифровых выходов на плате контроллера Arduino Uno при необходимости позволяет расширить функционал устройства, дополнительно добавив возможности контроля температуры, беспроводного управления, удаленного доступа и т.д. Несколько усложнив программу и подключив комплект к персональному компьютеру, можно архивировать данные по нагрузке в динамике для последующего анализа и оптимизации энергопотребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – СПб., 2015. – 448 с.
2. Джереми Б. Изучаем Arduino. Инструменты и методы технического волшебства. – СПб., 2016. – 336 с.
3. Официальный сайт компании ATMEL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atmel.com>.
4. Официальный сайт компании Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://blog.arduino.cc>.

ВОЛКОВ А. В., ИОНОВА Е. И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЯ ПОТОКА

ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РОТОРА

СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Аннотация. В статье представлен усовершенствованный метод определения температуры ротора для синхронных машин с постоянными магнитами при изменении динамических характеристик, управляя ослаблением основного магнитного потока. Рассматриваемый метод в значительной степени не зависит от условий охлаждения. Определение температуры ротора может происходить как в установившемся режиме с помощью эквивалентной тепловой модели, так и в динамическом режиме с введением в структуру эквивалентной тепловой модели наблюдателя температуры. Предложена тепловая модель, описывающая процессы изменения температуры электрической машины.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, постоянный магнит, температура, наблюдение потока, моделирование.

VOLKOV A. V., IONOVA E. I.

USE OF THE FLOW METHOD FOR DETERMINING TEMPERATURE

OF ROTOR FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Abstract. The paper presents an improved method for determining the temperature of the rotor for synchronous machines with permanent magnets at changing dynamic characteristics, driving a weakening of the main magnetic flux. The method largely depends on the cooling conditions. In the steady mode the temperature of the rotor can be determined using the equivalent thermal model. In the dynamic mode the temperature of the rotor can be determined by the introduction of the observer temperature in the structure of the equivalent thermal model. The study presents a thermal model describing the processes of changing the temperature of the electric machine.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, permanent magnet, temperature, flow monitoring, simulation.

Тяговые приводы, используемые в электрических и гибридных автомобилях, обычно используют синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) с использованием неодимового железа (NdFeB) в качестве материала постоянного магнита. Этот класс синхронных двигателей имеет два основных преимущества перед асинхронной машиной. Этими преимуществами являются более высокая плотность мощности и крутящего момента, а также более высокая эффективность при низких и средних скоростях. С другой стороны,

недостатком является температурная чувствительность материала постоянного магнита. Температура оказывает прямое влияние на остаточную плотность магнитного материала, поэтому исследование температуры помогает повысить точность определения расчетного крутящего момента [2].

Прямое измерение температуры постоянного магнита в большинстве случаев нецелесообразно, поскольку информация должна передаваться от ротора к статору предпочтительно с помощью какой-либо беспроводной технологии. В качестве альтернативы существуют три различных способа получения температуры ротора [1]:

- *тепловое моделирование;*
- *инжекционный метод;*
- *наблюдение потока.*

С одной стороны, тепловые процессы с сосредоточенными параметрами (ТПСП) дают возможность оценить не только температуру ротора, но также и температуру в нескольких критически важных местах двигателя (например, в лобной части обмотки). С другой стороны, метод ТПСП требует много времени с точки зрения идентификации параметра и основывается на предположениях относительно теплового состояния двигателя. Кроме того, методы не могут быть использованы при любых условиях, так как они вызывают ток нулевой последовательности и, следовательно, пульсацию крутящего момента. Это приведет к дополнительным потерям и усилению колебаний приводной цепи. Более того, работа на более высоких скоростях может быть проблематичной, если сигнал вводимого напряжения приводит к нецелесообразным рабочим циклам. Этот основной метод менее чувствителен к изменяющимся условиям охлаждения или напряжениям промежуточного контура. В дополнение к [1], блок определения температуры ротора улучшен для применения в широком диапазоне скоростей и крутящего момента во время динамической работы. Основопологающим условием для обеспечения точного наблюдения температуры является точная модель машины, так как коэффициент k_{Br} достаточно мал и поток постоянных магнитов имеет очень малое значение, чтобы получить температурную погрешность не ниже 5 К. Производительность и точность модели машины с дискретным временем сильно зависит от двух аспектов:

1. *физическое моделирование;*
2. *численное моделирование.*

В результате учёта этих двух аспектов получается точная дискретная модель СДПМ. Затем эта модель будет дополнена механизмом обратной связи, позволяющим оценивать изменения намагниченности и температуры ротора соответственно. Моделирование

показывает необходимость надлежащей временной дискретизации.

Модель состоит из трёх параметров, где нужно идентифицировать только два. Хотя R_s (сопротивление статора) довольно просто идентифицировать, нелинейная функция $f_{dq}^{-1}(\psi_{dq})$ требует немалых усилий для преобразования. Температурный коэффициент k_{Br} может быть взят из данных паспорта или экспериментальных измерений при холостом ходе.

При данном методе используется модель согласно системе уравнений

$$\begin{cases} \psi_{dq,k} = R^{-1}(\varphi_k) \left[\psi_{dq,k-1} + T_a u_{dq,k-1} - T_a R \left(\frac{\varphi}{2} k \right) R_s i_{dq,k-1} \right]; \\ i_{dq,k} = f_{dq}^{-1}(\psi_{dq,k}); \\ \varphi_{k+1} = \varphi_{k+1} - \varphi_k \approx \omega_k T_a; \\ R(\varphi_{k+1}) = R(\varphi_{k+1}) R^{-1}(\varphi_k), \end{cases} \quad (1)$$

где u – напряжение статора, i – ток статора, ω – угловая скорость, ψ – связанный поток, а T – крутящий момент машины, R_s – сопротивление статора и обычно нелинейное соотношение f_{dq}^{-1} между статором и потоком.

Далее добавляется обратная связь, основанная на ошибке между наблюдаемым и измеренным током:

$$\hat{\psi}_{dq,k} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} k_i T_a (i_{dq,k} - \hat{i}_{dq,k}) + \hat{\psi}_{dq,k-1}. \quad (2)$$

Здесь $\hat{\psi}$ и \hat{i} обозначают наблюдаемые величины. Наблюдаемые токи рассчитываются как:

$$\hat{i}_{dq,k} = f_d^{-1}(\hat{\psi}_{dq,k} + \hat{\psi}_{dq,k,\omega}). \quad (3)$$

Из выражения (7) абсолютная температура ротора может быть вычислена через:

$$\theta_{r,k} = \frac{\hat{\psi}_{d,k}}{k_{Br} \psi_{p,0}} + \theta_{r,0}. \quad (4)$$

Полная структурная схема наблюдателя данного метода изображена на рисунке 1.

Затем необходимо исследовать динамику наблюдателя, чтобы получить соответствующее правило выбора коэффициента обратной связи k_i .

$$G_{RTO}(z) = \frac{\hat{\psi}_d}{\psi_d} = \frac{m_3 z^3 + m_2 z^2 + m_1 z + m_0}{n_3 z^3 + n_2 z^2 + n_1 z + n_0}. \quad (5)$$

Передаточная функция дискретного времени (5) действительна, если выполняется линейная зависимость (6)

$$\psi_{dq} = f_{dq}(i_{dq}) = \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \psi_p \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где индуктивность L_d и L_q считаются постоянными в данной рабочей точке. Кроме того, предположение о постоянной скорости ω должно быть выполнено. Коэффициенты для выражения (5) задаются как:

$$\begin{aligned} m_3 &= 0; \\ m_2 &= -L_q T_a k_i; \\ m_1 &= 2L_q T_a k_i \cos(\omega T_a) - R_s T_a^2 k_i \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right); \\ m_0 &= R_s T_a^2 k_i \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) - L_q T_a k_i; \\ n_3 &= L_d L_q; \\ n_2 &= L_d R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) - L_q T_a k_i - 2L_d L_q \cos(\omega T_a) - \\ &\quad - L_d L_q + L_q R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right); \\ n_1 &= R_s^2 T_a^2 + L_d L_q + 2L_d L_q \cos(\omega T_a) - \\ &\quad - R_s T_a^2 k_i \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) + 2L_q T_a k_i \cos(\omega T_a) - \\ &\quad - 2L_d R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) - 2L_q R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right); \\ n_0 &= R_s T_a^2 k_i \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) - L_d L_q - L_q T_a k_i - \\ &\quad - R_s^2 T_a^2 + L_d R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) + L_q R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Как видно из (5) и (7), поведение зависит исключительно от параметров машины и скорости. Точка максимального значения фазного тока и напряжения теоретически не имеет

значения. На практике, однако, эти величины будут играть определенную роль, главным образом, из-за ошибок измерения и дискретизации (ошибка квантования). Структура наблюдателя приведена на рисунке 1. Диаграмма для постоянных параметров машины приведена на рисунке 2.

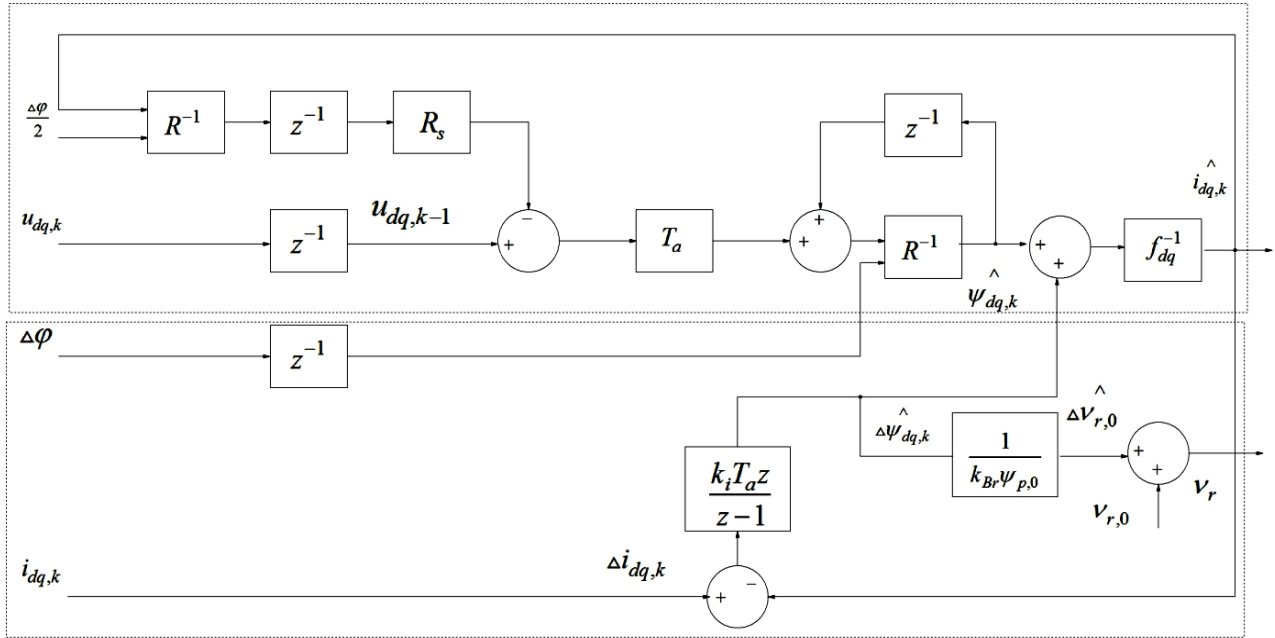


Рис. 1. Структура наблюдателя: верхняя часть модели соответствует выражению (1); нижняя часть служит для создания структуры наблюдателя.

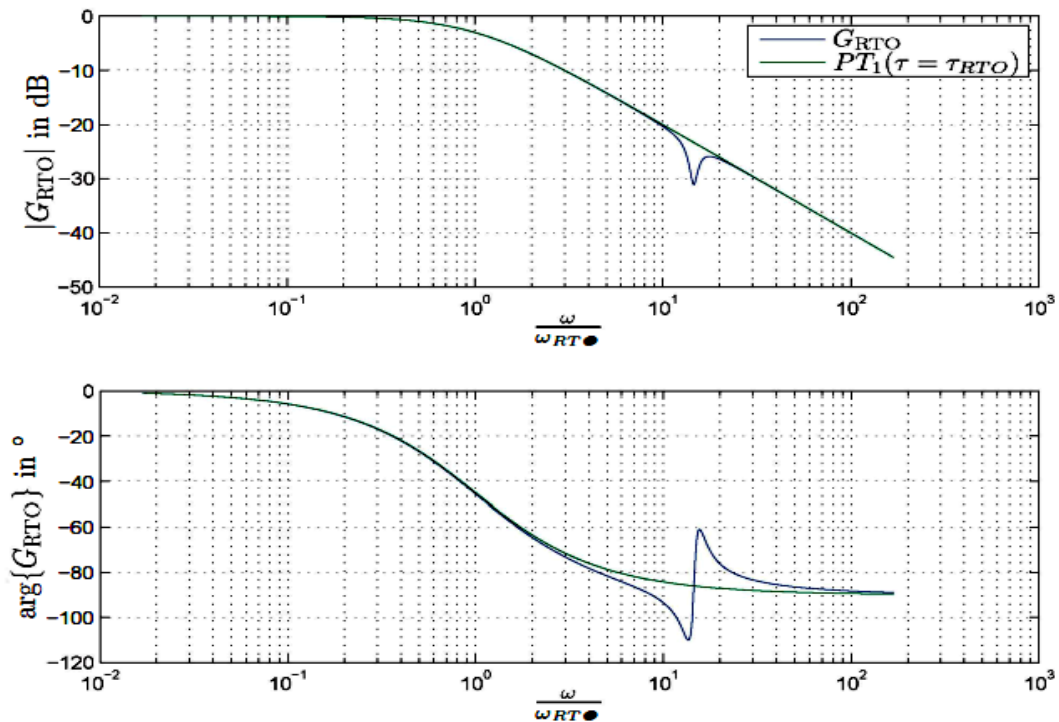


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ передаточной функции G_{RTO} по сравнению с низкочастотным фильтром первого порядка с постоянной времени τ_{RTO} .

Вывод. Предложен метод определения температуры ротора с использованием дополнительного наблюдателя потока. В качестве обязательного условия была введена модель дискретного электродвигателя. Результаты моделирования показали значительно лучшую дискретизацию по сравнению со стандартными уравнениями первого порядка. Рассмотренный метод может быть легко реализован на часто используемых платформах реального времени, и усилия по идентификации параметров приемлемы. Результаты измерений оказались удовлетворительными для наблюдателей в широком диапазоне скоростей и крутящего момента. Точность наблюдателя сильно коррелирует со скоростью машины и для очень низких скоростей, метод не может быть применен. Это не очень критично, так как тепловая динамика ротора довольно медленная и не значительно возрастает в этом диапазоне скоростей. На средних и высоких скоростях была достигнута абсолютная ошибка наблюдателя ниже 5 К. Таким образом, наблюдатель температуры ротора, по-видимому, применим к широкому спектру тяговых применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков А. В. Определение температуры постоянных магнитов в синхронном двигателе с помощью эквивалентной тепловой модели // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 4. – № 1. – С. 110–118.
2. Sebastian T. Temperature Effects on Torque Production and Efficiency of PM Motors Using NdFeB Magnets // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1995. – Vol. 31. – Iss. 2. – pp. 353–357.
3. Kral C., Haumer A., Lee S. B. A Practical Thermal Model for the Estimation of Permanent Magnet and Stator Winding Temperatures // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – Vol. 29, No. 1. – pp. 455–464.
4. Huber T., Peters W., Backer L. Monitoring Critical Temperatures in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Low Order Thermal Models // International Power Electronics Conference. – Hiroshima, 2014. – pp. 1508–1515.

КАРАСЕВ А. В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАТИМЫМ
ТРЕХФАЗНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ В СРЕДЕ PSIM**

Аннотация. Рассматриваются некоторые особенности моделирования системы управления обратимого трехфазного выпрямителя на транзисторных модулях в среде PSIM. Получены две модели для исследования переходных и установившихся режимов. Представлены результаты моделирования.

Ключевые слова: выпрямитель, транзисторный модуль, модель, система управления, энергетические характеристики.

KARASEV A. V.

STUDY OF REVERSIBLE THREE-PHASE RECTIFIER CONTROL SYSTEM IN PSIM

Abstract. Some features of simulation of the reversible three-phase rectifier control system on transistor modules in the PSIM are considered. Two models have been obtained for the study of transient and steady modes. The simulation results are provided.

Keywords: rectifier, transistor module, model, control system, power characteristics.

Освоение промышленностью мощных IGBT модулей и использование цифровых систем управления на основе сигнальных процессоров и программируемой логики открывают новые возможности в схемотехнических решениях трехфазных выпрямителей с характеристиками, приближающимися к идеальным. Такие выпрямители необходимы в современных преобразователях частоты, предназначенных для управления электроприводами переменного тока различного назначения. Важными требованиями к преобразователям являются высокие энергетические характеристики и возможность рекуперативного торможения с возвратом энергии в сеть переменного тока.

Кафедра электроники и электротехники уже несколько лет разрабатывает цифровые системы управления для различных преобразователей частоты. Удобным инструментом для проектирования и отладки алгоритмов управления, подбора параметров реактивных элементов силовых схем является система моделирования PSIM [1]. Данная система имеет модели всех необходимых элементов силовых схем и систем управления в своих библиотеках [2].

На рисунке 1 приведена модель трехфазного выпрямителя на IGBT модулях со стабилизацией выходного напряжения и контролем коэффициента мощности.

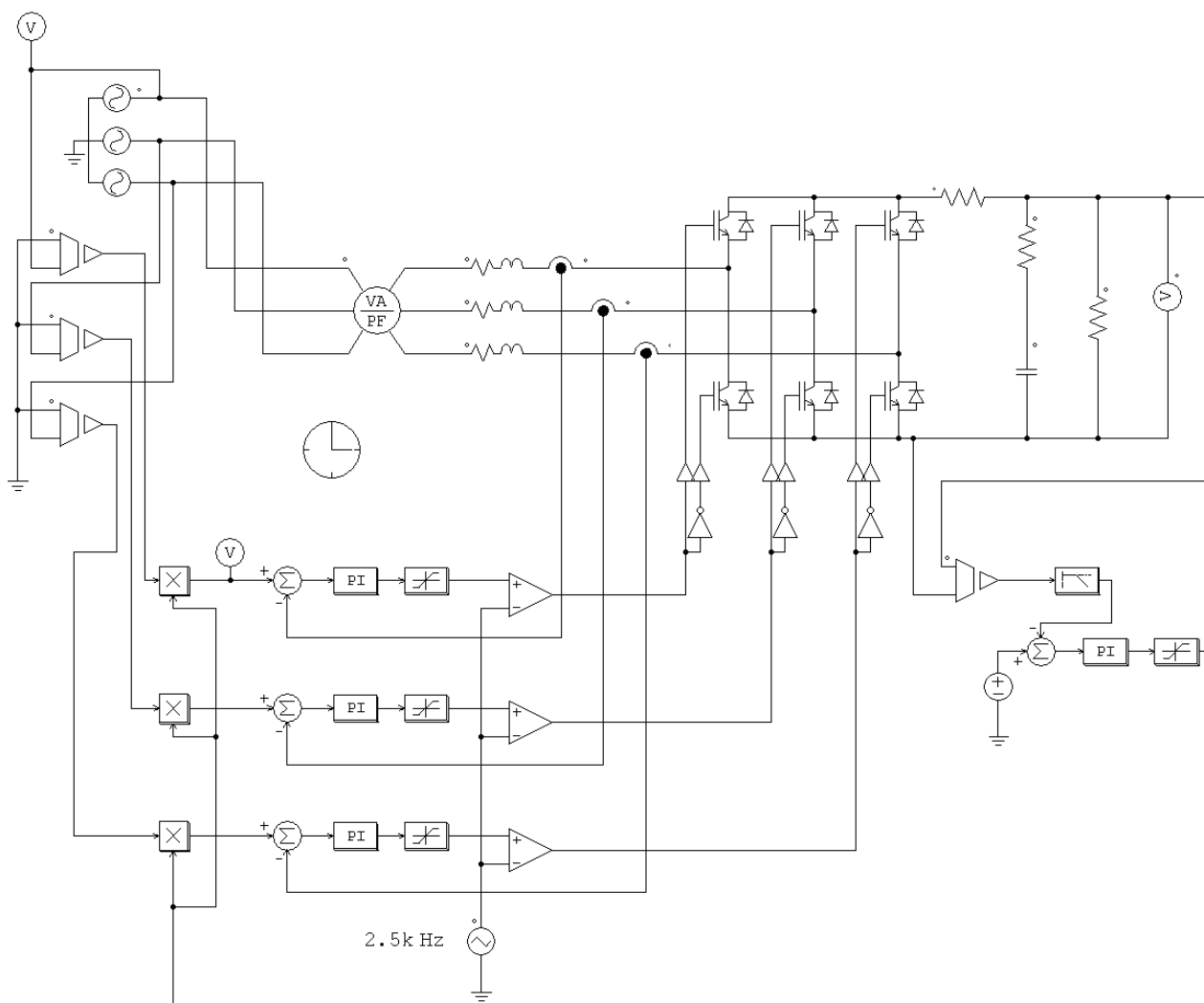


Рис. 1. Модель системы управления в режиме выпрямления.

Система управления приведенным выпрямителем может быть построена несколькими разными способами [3; 4]. В данной модели реализован способ релейного формирования формы входного тока выпрямителя по задающим фазным сетевым напряжениям, что позволяет получить высокий коэффициент мощности. Величина входного тока задается обратной связью по выходному напряжению. Для получения наилучших характеристик значение выходного напряжения должно быть больше амплитуды линейного напряжения питающей сети. В данном случае при напряжении питающей сети 380 В используется стабилизация выходного напряжения на уровне 700 В.

Частота модуляции должна быть согласована со значением индуктивности входных дросселей и значением мощности выпрямителя. Так для мощности 50 кВА использована частота модуляции 2,5 кГц и значение индуктивности 1 мГн, что позволило получить практически синусоидальный входной ток с нулевым сдвигом относительно сетевого напряжения и небольшой уровень пульсаций выходного напряжения, рисунок 2.

Требуемое значение пульсаций выходного напряжения может быть подобрано изменением емкости выходного конденсатора (рис. 3).

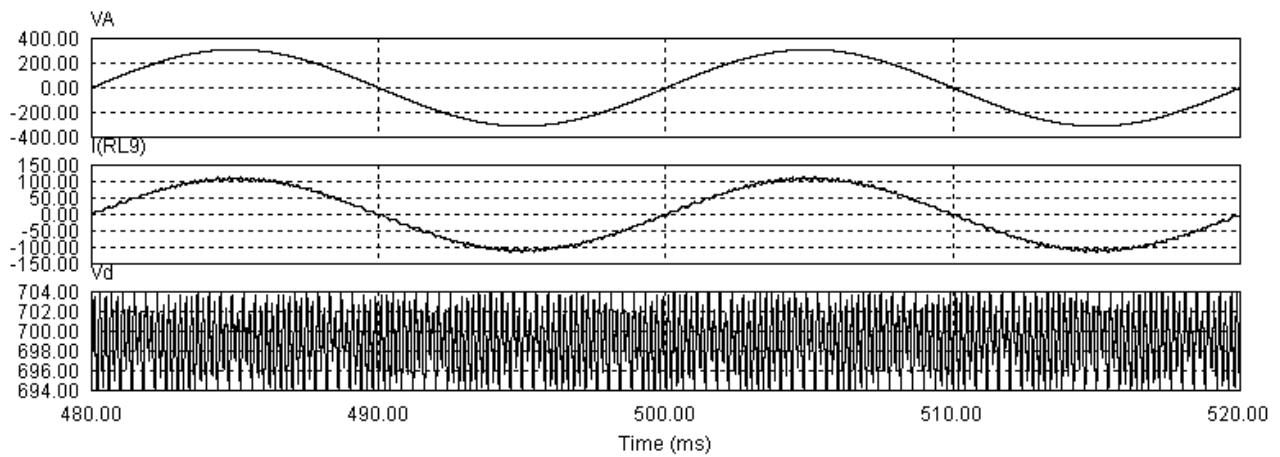


Рис. 2. Напряжение сети U_A , входной ток I и выходное напряжение выпрямителя U_d в установившемся режиме.

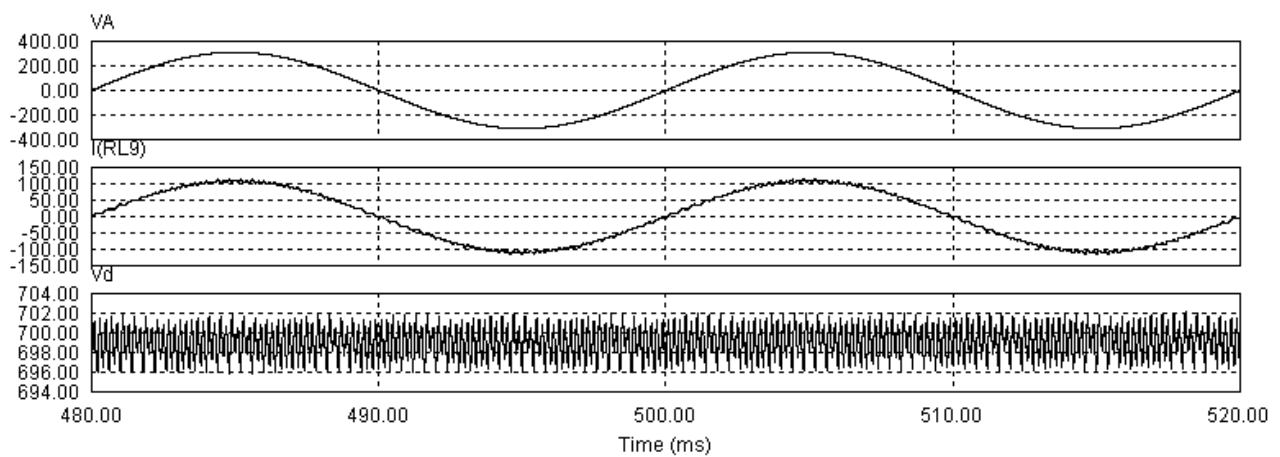


Рис. 3. Входной ток I и выходное напряжение выпрямителя U_d в установившемся режиме при увеличении емкости выходного фильтра в 2 раза.

Результаты моделирования пуска и интегральные характеристики выпрямителя показаны на рисунках 4 и 5.

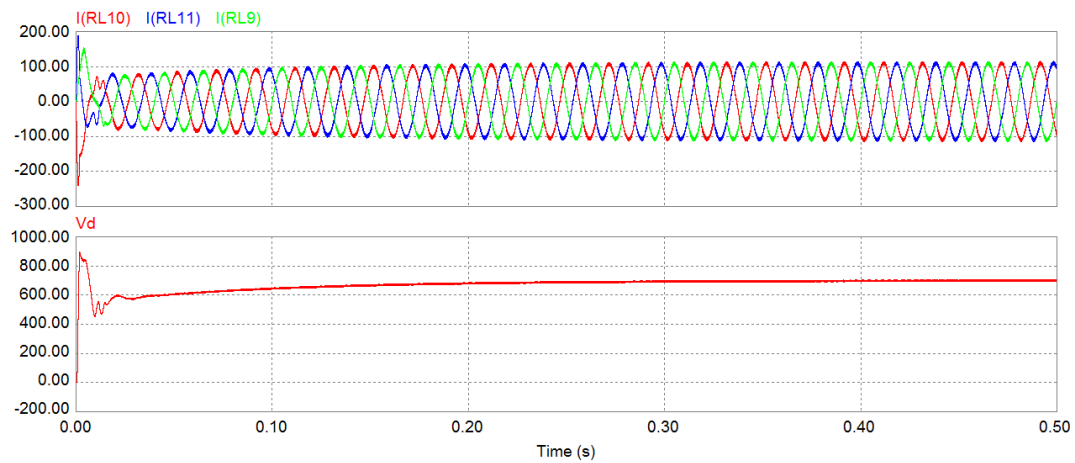


Рис. 4. Входные токи I и выходное напряжение U_d выпрямителя в режиме пуска.

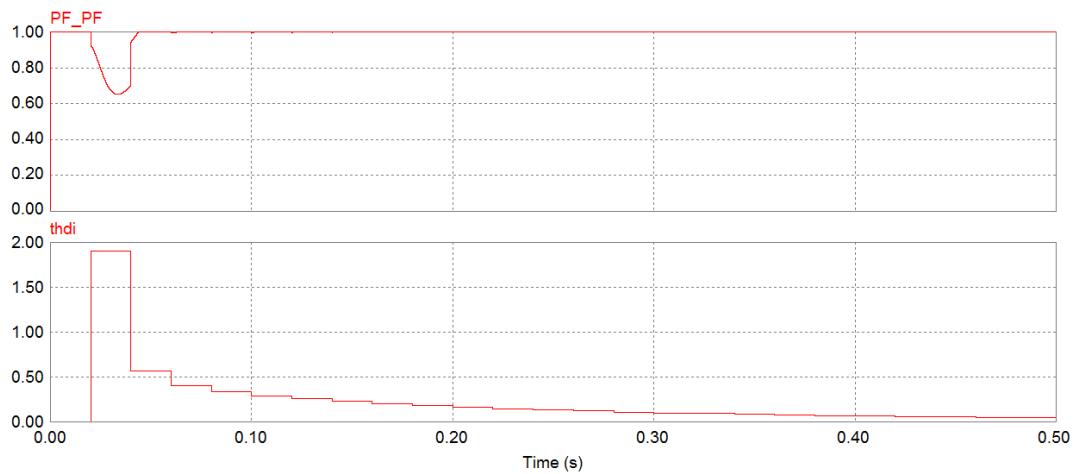


Рис. 5. Коэффициент мощности PF и коэффициент несинусоидальности $thdi$ входного тока выпрямителя.

В режиме рекуперации энергии нагрузки в питающую сеть, модель системы управления приведена на рисунке 6. Здесь преобразователь является источником тока, форма которого близка к синусоиде, а величина задается обратной связью по напряжению в цепи постоянного тока. Результаты моделирования режима рекуперации приведены на рисунке 7.

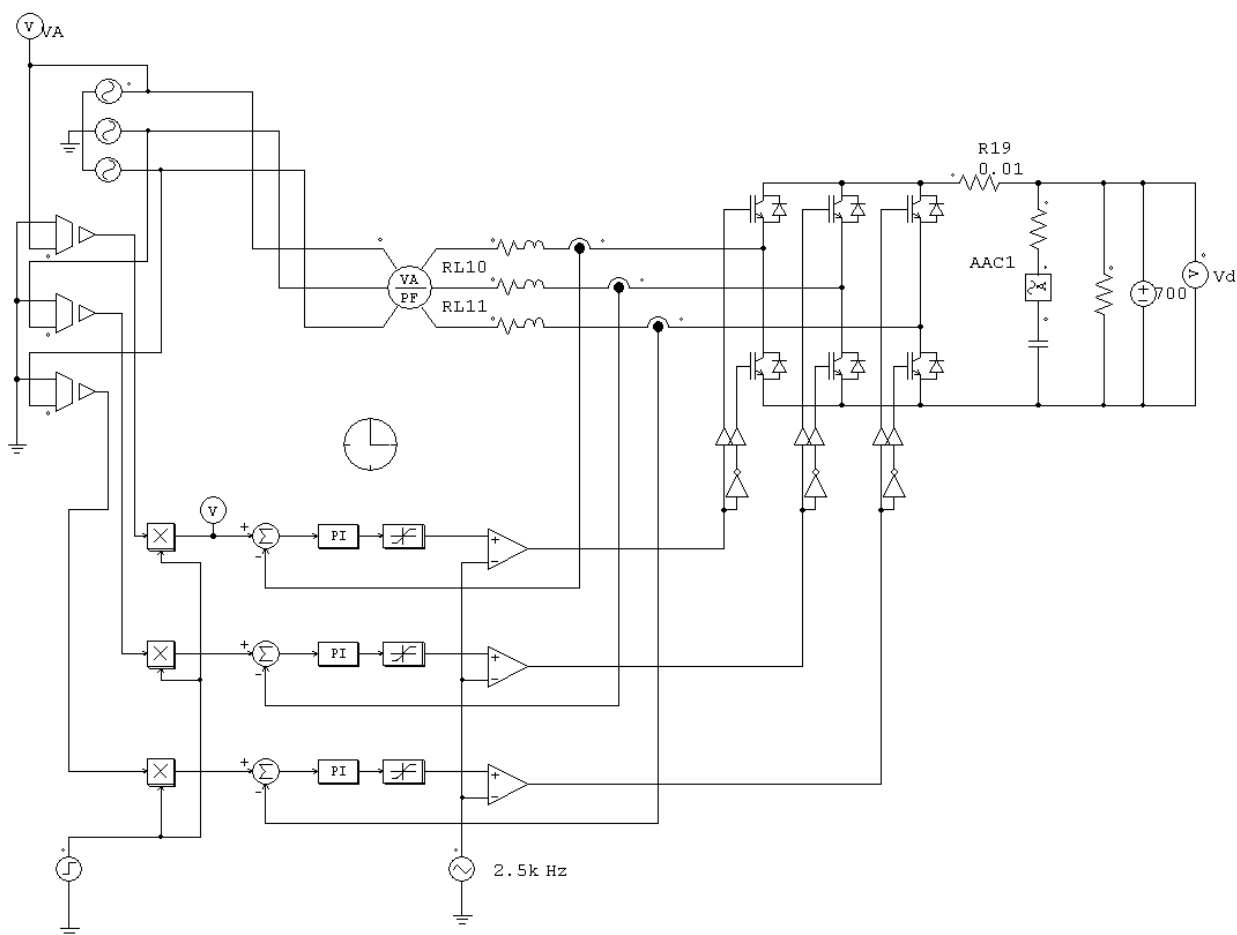


Рис. 6. Модель системы управления в режиме рекуперации.

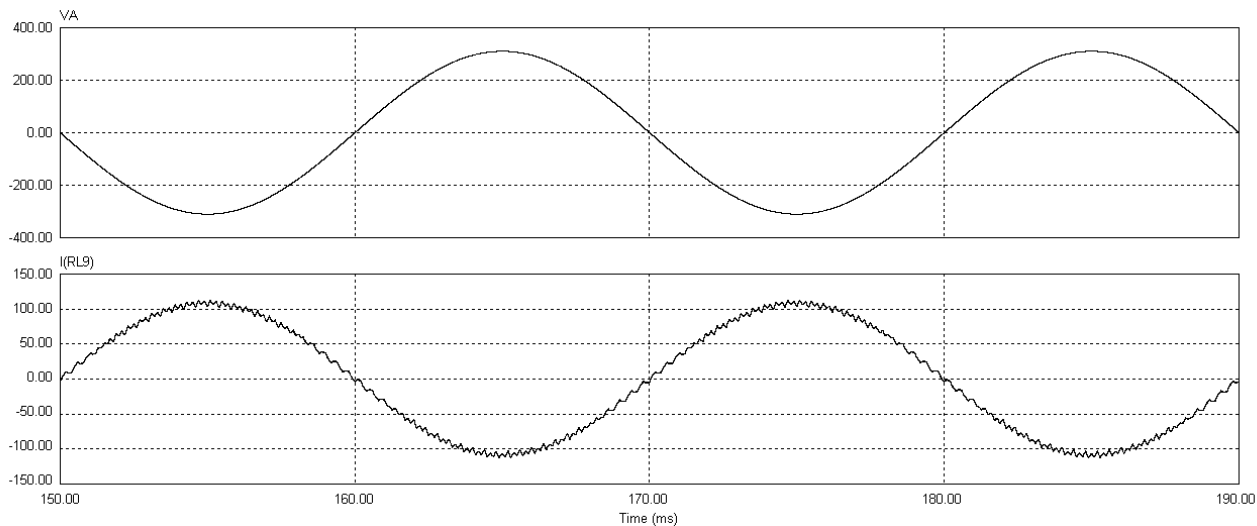


Рис. 7. Сетевое напряжение UA и ток I в режиме рекуперации.

Таким образом, разработанные модели системы управления обратимым выпрямителем позволяют исследовать все необходимые характеристики в переходном и установившемся режимах, определить оптимальные значения варьируемых параметров, настроить алгоритм управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система моделирования PSIM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://powersimtech.com>.
2. Карасев А. В., Тетюшкин В. С. Некоторые особенности моделирования устройств силовой электроники в системе PSIM // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: материалы XII Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Саранск: Издатель Афанасьев В. С., 2017. – С. 573–577.
3. Карасев А. В., Евдокимов А. С. Моделирование источника электропитания с высоким коэффициентом мощности // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: материалы XII Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Саранск: Издатель Афанасьев В. С., 2017. – С. 577–580.
4. Карасев А. В., Тетюшкин В. С. Модель обратимого трехфазного выпрямителя // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: материалы XII Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Саранск: Издатель Афанасьев В. С., 2017. – С. 569–573.