На правах рукописи

МИШИН АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМ ИНВЕРТОРОМ С НИЗКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ

Специальности: 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» **Доманов Виктор Иванович**

Официальные оппоненты:

Туищев Алексей Иванович,
доктор технических наук, действительный член Академии информатизации образования, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Тольяттинского государственного университета, г. Тольятти.

Стариков Александр Владимирович,
доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет сервиса», г. Тольятти.**

Защита диссертации состоится 16 марта 2016 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета. Так же диссертация и автореферат размещены в сети Internet на сайте УлГТУ – http://www.ulstu.ru/.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба выслать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» января 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор Смирнов Виталий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сварочные инверторы положительно зарекомендовали себя среди потребителей. Хорошая управляемость, возможность работы в различных режимах, компактность, экономичность выгодно отличают их от классических сварочных устройств. Однако в работе с такими аппаратами требуются определенные навыки, отсутствие которых не исправляется качеством используемого оборудования.

Это связано с тем, что в процессе ручной электродуговой сварки человек является звеном технологического процесса – обеспечивает стабильность горения дуги (поддерживает длину дугового промежутка в допустимых пределах). Таким образом, человек оказывается включенным в контур управления и его параметры влияют на показатели сварки: производительность, качество шва и т.д.

В области теории и разработки сварочного электрооборудования (в том числе на основе инверторных схем) можно выделить работы следующих ученых: В.Г. Геворкяна[1], И.М. Готтлиба[2], Б.Е. Патона[3], С.А. Эраносяна[4], Г.С. Зиновьева[5].

Ряд исследователей [6,7,8] с различных позиций рассматривали человека – оператора как звено системы автоматического управления. В этом случае динамические характеристики системы будут зависеть от его возможностей с точки зрения восприятия, переработки и использования поступившей информации. Усталость и другие причины негативно сказываются на психофизиологическом состоянии человека. Это отражается на его биологических функциях – изменение поведенческих способностей, торможение моторных функций и т.д. Поэтому можно считать, что ручная электродуговая сварка представляет систему с переменными параметрами.

Длина сварочной дуги, определяющая ток, мощность, качество шва и ряд других показателей технологического процесса, содержит случайную составляющую, которая зависит от оператора и состояния кромок свариваемых деталей. Кроме этого в процессе сварки могут изменяться параметры системы. Для сохранения качественных показателей в таких случаях используют адаптивные системы.

---

[1] Геворкян, В. Г. Основы сварочного дела : Учебник для строит. спец. техникумов / В. Г. Геворкян. – М. : Высш. шк., 1985. – 168 с.
[2] Готтлиб, И. М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы / И. М. Готтлиб ; пер. с англ. под ред. С. А. Лужанского. – М. : Постмаркет, 2000. – 552 с.
[3] Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет : К. В. Фролов (пред.) [и др.]. М. : Машиностроение. Оборудование для сварки. Т. IV-6 / В. К. Лебедев [и др.] ; под. ред. Б. Е. Патона. 1999. – 496 с.
[4] Эраносян, С.А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями / С. А. Эраносян. – Л. : Энергоатомиздат. Ленигр. отд-ние, 1991. – 176 с.
[5] Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
[6] Цибулевский, И. Е. Человек как звено следящей системы / И. Е. Цибулевский. – М. : Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 288 с.
[7] Абашин, В.Г. Автоматизация процесса определения психофизического состояния оператора автоматизированного рабочего места в АСУТП : автореферат дис. ... канд. техн. наук ; Изд-во: Орел ГТУ, 2008. – 18 с.
[8] Шишмарев, В.Ю. Теория автоматического управления: учебник для студ. учреждений высш. проф. Образования / В.Ю. Шишмарев. – М. : издательский центр «Академия», 2012. – 312 с. – (сер. Бакалавриат).

Вопросами исследования адаптивных систем, математическим описанием и принципами их построения занимались такие исследователи как В.А. Бесекерский[9], А.С. Клюев[10], А.А. Воронов[11], А.А. Красовский[12], Н.Д. Егупов[13], В.Г. Каширских[14], Л.А. Растригин[15], М.В. Никитина[16], А.В. Мамонов[17], К.Ю. Мальчиков[18] и многие др.

Все это усложняет создание эффективной системы управления сварочным инвертором. Задача может быть решена с помощью:

- синтеза системы с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям;
- создания адаптивной системы управления.

Это позволит улучшить характеристики процесса сварки, уменьшить количество обрывов сварочной дуги и технологических коротких замыканий.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка элементов системы управления сварочными инверторами для снижения дисперсии сварочного тока и синтеза системы управления с учетом человека-оператора как звена системы.

Задачи научного исследования:

1. Провести анализ существующих систем управления и методов построения инверторных систем, в том числе и систем с низкой чувствительностью.
2. Определить пути снижения чувствительности к параметрическим изменениям с сохранением основных качественных характеристик за счет более полного использования информации о процессе и звеньях системы.
3. Разработать элементы системы управления, а именно: вычислитель параметров случайного сигнала и адаптивный регулятор.
4. Провести синтез системы управления процессом сварки с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям.

---

[9] Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб. : Изд-во «Профессия», 2004. – 752 с. – (Серия: Специалист).

[10] Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / под ред. А.С. Клюева. – изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.

[11] Теория автоматического управления: Учеб. для вузов для спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А. А. Воронов, Д. П. Ким, В. М. Лохин и др.; под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986 – 504 с.

[12] Красовский, А. А. Основы автоматики и технической кибернетики / А. А. Красовский, Г. С. Поспелов. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 600 с.

[13] Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 3-х т. / под ред. Н. Д. Егупова. - М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана.

[14] Каширских, В. Г. Теория автоматического управления : В 2 ч. Ч. 2. Нелинейные и специальные системы : Учеб. пособие / В. Г. Каширских. – Кемерово, 2004. – 98 с.

[15] Растригин, Л.А. Системы экстремального управления / Л. А. Растригин. – М. : Изд-во «Наука», 1974. – 632 с.

[16] Никитина, М.В. Импульсные усилительно-преобразовательные устройства в адаптивных системах управления : дис. … канд. техн. наук : 05.13.05 / М. В. Никитина ; Санкт-Петерб. гос. ун-т информационных технологий, механики и оптики. – СПб., 2006 – 170 с.

[17] Мамонов, А. В. Устройства для построения помехозащищенных контуров управления объектами с запаздыванием : дис. … канд. техн. наук : 05.13.05 / А. В. Мамонов ; Харьковский политехн. ин-т. – Харьков, 1984 – 218 с.

[18] Мальчиков, К. Ю. Расширение динамического диапазона датчиков встроенного контроля параметров дисперсной фазы рабочей жидкости : дис. … канд. техн. наук : 05.13.05 / К. Ю. Мальчиков; Самарский гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королева. – Самара, 2009 – 130 с.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложено использовать упреждающую коррекцию в системе управления сварочным инвертором для снижения чувствительности к вариациям параметров объекта;

2. Предложено использовать адаптивный регулятор в системе с целью снижения дисперсии сварочного тока;

3. Разработана модель системы управления процессом сварки, учитывающая влияние человека-оператора как звена системы автоматического регулирования.

Основные положения, выносимые на защиту следующие:

1. Модель системы управления сварочным инвертором, включающая новые элементы – упреждающую коррекцию и адаптивный регулятор в контуре регулирования, позволяющие снизить чувствительность системы к параметрическим изменениям и влияние человека-оператора на ее динамику.

2. Результаты синтеза новых элементов системы управления сварочным инвертором (вычислителя параметров случайного сигнала, адаптивного регулятора тока), обеспечивающих его более высокие технические показатели.

3. Результаты теоретических исследований и моделирования системы управления сварочным инвертором, включающей новые элементы, показывающие ее низкую чувствительность к параметрическим изменениям при влиянии случайных сигналов.

4. Сравнительный анализ результатов моделирования процесса сварки с результатами экспериментальных исследований на макете, подтверждающий их согласованность и достижение более высоких технических показателей – снижение дисперсии сварочного тока в пределах 30÷35 %.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана новая структурная схема системы управления сварочным инвертором.

2. Разработаны элементы системы управления, а именно вычислитель параметров случайного сигнала и адаптивный регулятор тока.

3. Снижена дисперсия сварочного тока, что обеспечивает более высокое качество технологического процесса, снижение энергопотребление, снижение количества обрывов дуги и технологических коротких замыканий, стабильность работы сварочных инверторов.

Методы исследования заключаются в использовании математического моделирования с применением ЭВМ, применении аппарата интегрального и дифференциального исчисления, теории электродуговых процессов. Анализ системы проведен на ЭВМ с применением программного комплекса МВТУ 4.0.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих НТК:

- Международная научно-технической конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», г. Севастополь, 2012 г.;

- VII Международная (XVIII Всероссийская) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2012», г. Иваново, 2012 г.;

- XVII Всеукраинская студенческая научно-техническая конференция «Электротехнические и электромеханические системы», г. Севастополь, 2013 г.;

- VIII Международная (XIX Всероссийская) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2014», г. Саранск, 2014 г.;

- XX Крымская студенческая научно-техническая конференция «Электротехнические и электромеханические системы», г. Севастополь, 2015 г.;

- молодежные инновационные форумы приволжского федерального округа, г. Ульяновск, 2009-2011 г.;

- внутривузовские научно-технические конференции УлГТУ, г. Ульяновск, 2009-2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, включая 5 статей из перечня ВАК, 1 патент на полезную модель, 2 патента на изобретение, 2 свидетельства о регистрации программно-информационного продукта.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы, включающего 123 наименования, заключения и приложения. Общий объем диссертации 159 страниц машинописного текста, включающего 85 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность темы, определён круг рассматриваемых вопросов, дана краткая характеристика работы в целом.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведен обзор адаптивных систем управления. Приведены и описаны основные методы адаптации САУ. Показаны методы нахождения экстремума критерия качества исследуемой системы. Сформулированы требования к такого рода системам управления. Приведены основные приемы снижения чувствительности, позволяющие улучшить качество сварочного процесса и повысить динамические характеристики системы. Обоснована необходимость исследования в этом направлении.

Во второй главе рассматривается сварочная дуга как элемент системы управления, ее природа, условия возникновения и существования, основные соотношения. Приводятся математическое описание и модель сварочной дуги, связываются основные параметры дуги с внешними воздействиями.

Силовая часть мощного ключевого преобразователя, его конструкция, существенно влияют на основные качественные характеристики устройства – энергоэффективность, надежность и компактность. В связи с этим проводится сравнительный анализ инверторов тока и обосновывается выбор наиболее оптимального решения для выполнения поставленных задач.

Проведен сравнительный анализ различных адаптивных систем, определены их достоинства и недостатки. Обосновывается применение адаптивного регулятора в конкретном рассматриваемом случае.

Плавка металла осуществляется за счет энергии электрической дуги. Регулирование электрического режима осуществляется изменением длины дуги посредством перемещения электрода и регулирования тока. Из-за наличия в приэлектродных областях пространственных зарядов возникают приэлектродные падения потенциала. Приэлектродные процессы вызывают неравномерное распределение потенциала по длине дуги. Из-за небольшой протяженности приэлектродных областей катодное и анодное падения потенциала могут быть представлены в виде скачков напряжения. Ввиду отсутствия в столбе дуги нескомпенсированных объемных зарядов напряжение по длине столба меняется монотонно примерно по линейному закону

$$U_{ст.д.} = \beta l_{д},$$

где β – параметр, называемый градиентом потенциала и равный средней напряженности электрического поля в столбе.

Тогда полное напряжение дуги

$$U_{Д} = U_{К} + U_{А} + \beta l_{д} = U_{К\text{-}А} + \beta l_{д}.$$

Для нерегулируемого источника E_0 характеристика $I_{д} = f(l_{д})$ представлена на рис. 1.

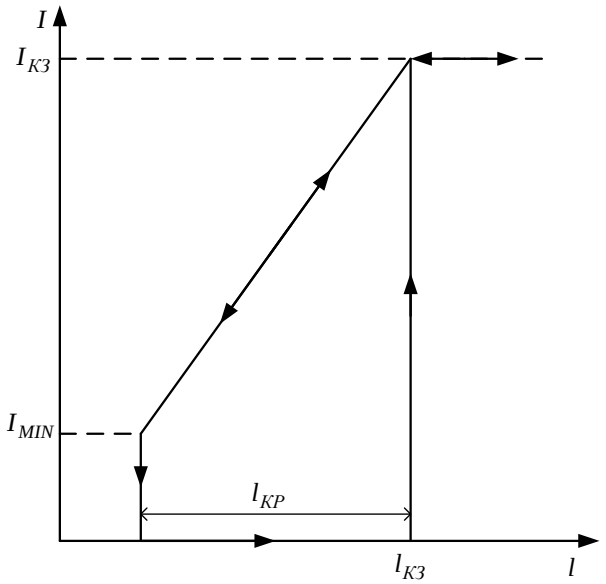

Рис. 1. Зависимость тока дуги от длины дуги:

I_{MIN} – ток обрыва дуги, $l_{КЗ}$ – расстояние от верхней точки положения электрода до металла

Для этого случая возможность регулирования непрерывного тока дуги ограничена диапазоном $I_{MIN} < I_Д < I_1$, где I_1 – номинальное значение тока используемого электрооборудования.

Модель дуги постоянного тока можно представить следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} R_Ц I_Д + L_Ц(I_Д)\dfrac{dI_Д}{dt} = E - \alpha - \beta(l + \Delta l) \\ l_{КР} < l < l_{КЗ} \\ I_Д = I_{КЗ} = const \;\; при \;\; l_Д > l_{КЗ} \\ I_Д = I_{MIN} \to 0 \;\; при \;\; l_Д \to 0 \end{cases} \qquad (1)$$

где $R_Ц$ – активное сопротивление силовой цепи, Ом; $I_Д$ – ток дуги, А; $L_Ц$ – индуктивность силовой цепи, Гн; E – выпрямленная ЭДС силовой цепи, В; α – приэлектродные падения потенциалов, В; β – градиент потенциала в столбе дуги, В/мм; l – перемещение электрода, мм; Δl – случайное изменение длины дуги, мм; $l_{КР}$, $l_{КЗ}$ – перемещение электрода, соответствующее обрыву дуги и короткое замыкание.

Система уравнений (1) характеризует нелинейные свойства цепи силового тока. Индуктивность цепи ($L_Ц$) складывается из приведенной индуктивности трансформатора (L_T) и индуктивности дросселя ($L_{др}$). Дроссель расположен в цепи постоянного тока и обычно выполнен частично насыщающимся, поэтому $L_{др}$ является функционально зависимой от силового тока $I_Д$. С увеличением тока происходит частичное насыщение магнитопровода, при этом снижается величина $L_{др}$. Кроме того, параметры α, β, R_X существенно зависят от режима работы. На основании этого функциональная схема рассматриваемой цепи принимает вид согласно рис. 2.

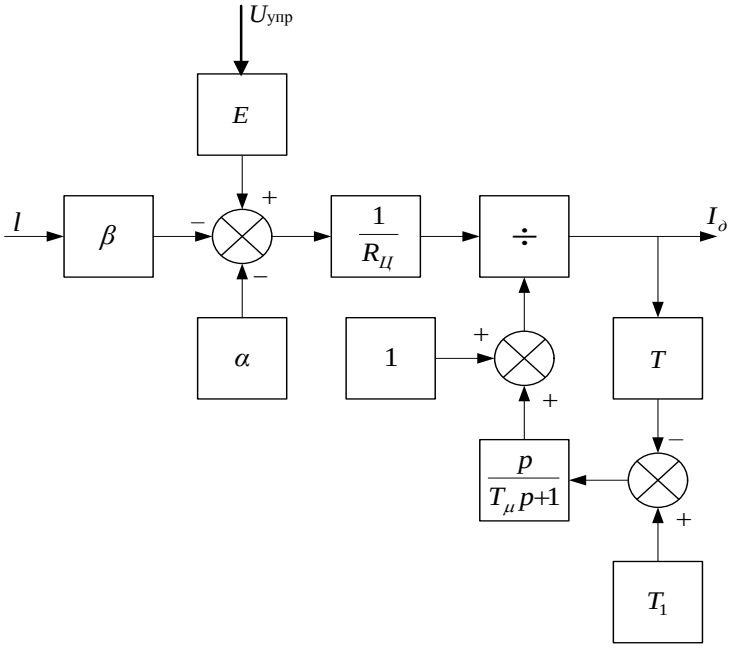

Рис. 2. Функциональная схема дуги постоянного тока

Существующее большое разнообразие различных схем инверторов тока (ИТ) позволяет выделить общую структуру устройств на основе ИТ, а именно (рис. 3).

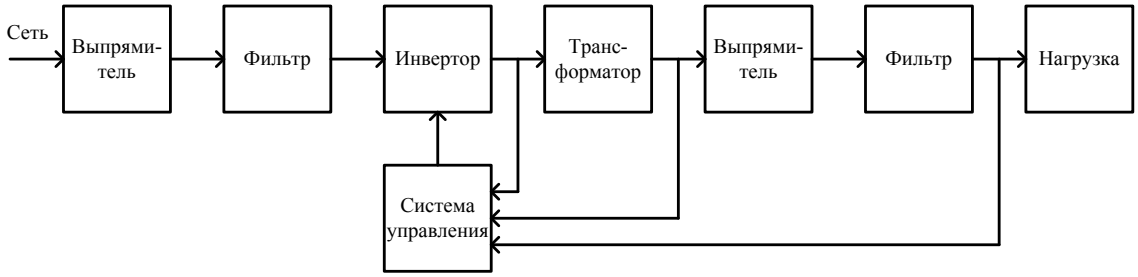

Рис. 3. Функциональная схема сварочного инвертора

Силовая часть мощного ключевого преобразователя, его конструкция, существенно влияют на основные качественные характеристики устройства – энергоэффективность, надежность и компактность.

Сравнение различных вариантов инверторов показало, что по кпд наилучшими показателями обладают мостовые схемы. В свою очередь полумостовые и прямоходовые схемы имеют более низкую стоимость. Поэтому целесообразно использовать мостовую схему в инверторах с токами более 150 А и полумостовую для меньших токов. Такое разделение «технологически» удобно и позволяет унифицировать основные узлы для этих схем.

В приведенной структуре основными элементами, определяющими технико-экономические показатели устройства, являются инвертор, трансформатор и система управления.

Не маловажным фактором, влияющим на стабильность дуги, являются процессы, протекающие в трансформаторе, такие как скин-эффект и эффект близости.

Скин-эффект является свойством высокочастотных токов течь по поверхности проводника, и заключающемся в распределении тока в проводнике таким образом, что плотность тока имеет наибольшее значение у поверхности проводника и уменьшается с увеличением глубины в проводнике.

Эффект близости характеризуется следующим образом – если ток течет в одном или нескольких близ лежащих проводников, например, в катушке индуктивности, распределение тока в первом проводнике будет ограничено меньшей областью. Получающееся распределение («сжатие») тока и есть эффект близости. Это вытеснение дает увеличение сопротивления цепи, которое увеличивается с частотой.

Изменение магнитного поля будет влиять на распределение электрического тока, протекающего в электрическом проводнике, посредством электромагнитной индукции. Когда переменный ток проходит через изолированный проводник, он создает связанное переменное магнитное поле вокруг него. Переменное магнитное поле индуцирует вихревые токи в соседних проводниках, изменяя общее распределение тока, протекающего через них. В результате ток сконцентрирован в областях проводника, находящихся дальше всего от соседних проводников, где ток течет в том же направлении.

Одним из вариантов борьбы с приведенными эффектами является использование, в качестве обмоточного провода трансформатора, литцендратов – многожильных проводов, каждая жила которых покрыта изолирующим лаком. Цель применения литцендратов, в противоположность простому собиранию в группу проводников, состоит в том, чтобы обеспечить равенство токов в каждом отдельно взятом проводнике.

В данной диссертационной работе анализируется применение ленточных проводников для обмотки высокочастотного трансформатора, что так же позволяет существенно снизить влияние эффекта близости и скин-эффекта. Тонкая лента шириной, равной ширине обмотки, особенно хороша для низких выходных напряжений, где требуется высокий ток в обмотке, большое сечение провода и всего несколько витков.

При использовании ленточных проводников увеличивается коэффициент заполнения, не возникает пустот между обмотками, значительно улучшается теплоотвод, увеличивается долговечность трансформатора и способность выдерживать перегрузки. Так же применение способствует существенному снижению осевых сил в обмотках, повышению механической прочности (витки ленты обычно склеиваются между собой), повышению надежности и технологичности.

В процессе работы объект управления может изменять свои характеристики. Поэтому однократная (первоначальная) настройка на оптимальный режим в этом случае не в состоянии обеспечить требуемые показатели качества в процессе всего рабочего времени. Это в полной мере относится к процессу сварки. В тоже время положение экстремума характеристики изменяется с точки зрения оператора случайным образом. Такое представление связано с неполной информацией об объекте. Основной задачей экстремального управления является определение положения экстремума в процессе работы.

Зависимость показателя качества от времени и динамических характеристик системы управления и объекта оказывают существенное влияние на способ определения экстремума. Поэтому алгоритм экстремального регулирования должен находиться в соответствии с параметрами объекта и системы управления.

В случае использования сварочного инвертора возникает возможность применения адаптивного регулятора, который позволит достичь оптимального режима работы с участием конкретного оператора и автоматического снижения чувствительности к параметрическим возмущениям, и как следствие снижение уровня дисперсии силового тока.

Третья глава посвящена синтезу системы с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям, учитывающей влияние оператора как звена автоматического регулирования.

На рис. 4 приведена структурная схема системы управления с учетом применения упреждающей коррекции для снижения чувствительности схемы к изменениям параметров объекта.

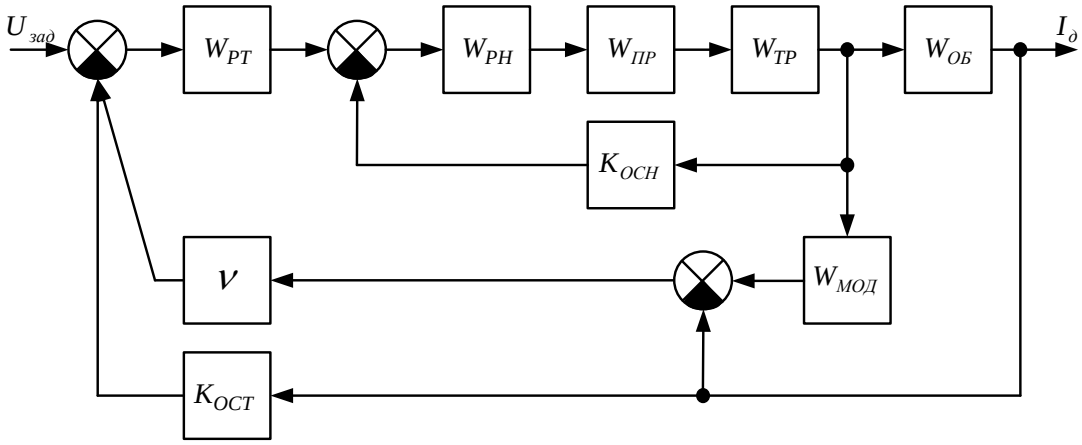

Рис. 4. Структурная схема системы.

Основными звеньями силовой цепи являются инвертор и трансформатор. Для стабилизации режимов работы устройства используются управляемый инвертор и цепи обратных связей.

Можно получить передаточную функцию трансформатора по напряжению

$$W_{тр}(p) = \frac{K_{НАГ} T_{тр1} p K_{ТР}}{T_{тр2} p + 1},$$

где $K_{НАГ} = \dfrac{R_H}{R_H + r_2}$, $T_{тр1} = \dfrac{M}{r_1}$, $T_{тр2} = \dfrac{L_1}{r_1} + \dfrac{L_2}{R_H + r_2}$, $K_{ТР} = \dfrac{\omega_2}{\omega_1}$, R_H – сопротивление нагрузки, ω – число витков обмотки.

Выходное напряжение трансформатора выпрямляется, в следствии чего его передаточная функция принимает вид:

$$W_{тр}(p) = \frac{K_{НАГ}(T_{тр1} p + 1) K_{ТР}}{T_{тр2} p + 1}.$$

Синтез регулятора напряжения выполняется исходя из настройки контура на технический оптимум:

$$W_{рн} \cdot W_{пр} \cdot K_{осн} \cdot \frac{K_{НАГ}(T_{тр1} p + 1) K_{ТР}}{T_{тр2} p + 1} = \frac{1}{2 p T_{\mu}(p T_{\mu} + 1)},$$

где $W_{пр}$=$K_{пр}$ – передаточная функция преобразователя на основе полумостовой инверторной схемы; $K_{осн}$ – коэффициент обратной связи по напряжению.

С учетом того, что при работе $R_H < R_2$, получаем передаточную функцию контура напряжения

$$W_{КН}(p) \approx \frac{1 / K_{ОСН}}{T_H p + 1}.$$

Для получения требуемой внешней характеристики устройства вводится обратная связь по току нагрузки, и, настраивая контур тока так же на технический оптимум, передаточная функция замкнутого контура тока $W_{KT}(p)$ принимает вид

$$W_{KT}(p) \approx \frac{1/K_{OCT}}{2\alpha T_H^2 p^2 + 2\alpha T_H p + 1},$$

где $\alpha = R_H / R_{HPAC}$.

Проводя анализ выражения для $W_{KT}(p)$ по чувствительности показателя колебательности M к α, и оценивая влияние изменения α на значение показателя колебательности можно сделать вывод о том, что значение колебательности M изменяется в широких пределах в зависимости от α. Для устранения этого недостатка используется упреждающая коррекция. Формирование корректирующего сигнала показано на рис. 4. Сигнал с датчика напряжения поступает на звено модели $W_{МОД}(p)$, параметры которого выбираются из условия

$$W_{МОД}(p) = W_{ОБ}(p)_{НОМ},$$

где $W_{ОБ}(p)_{НОМ}$ передаточная функция объекта в номинальном режиме.

Для рассматриваемого случая

$$W_{МОД}(p) = \frac{1/R_{HPAC}}{T_{PAC}p + 1}.$$

Сигнал с выхода звена модели сравнивается с сигналом обратной связи по току, в результате чего формируется дифференциальный сигнал, который с коэффициентом ν поступает на регулятор тока. Упрощенная передаточная функция замкнутого контура тока с упреждающей коррекцией $W_{КТУ}(p)$ имеет вид

$$W_{КТУ}(p) \approx \frac{1/K_{OCT}X}{2T_H^2 \frac{\alpha}{X} p^2 + 2T_H \frac{\alpha}{X} p + 1}.$$

где $X = 1 + \nu(\alpha - 1)$.

Показатель колебательности будет определяется выражением

$$M = \frac{1 + \nu(\alpha - 1)}{\sqrt{2\alpha[1 + \nu(\alpha - 1)] - \alpha^2}}$$

Проводя анализ данного выражения можно сделать следующие выводы:

– если $\nu = 1$, то M=const=1 независимо от значения α;

– если $\nu = 0$, то значение M соответствует системе без упреждающей коррекции;

– если $\alpha = 1$, то M=const=1 независимо от значения ν.

Таким образом, введение упреждающей коррекции позволяет создать систему, инвариантную к изменениям нагрузки в широких пределах. Более подробно влияние α и ν на значение M позволяет оценить 3D график, представленный на рис. 5.

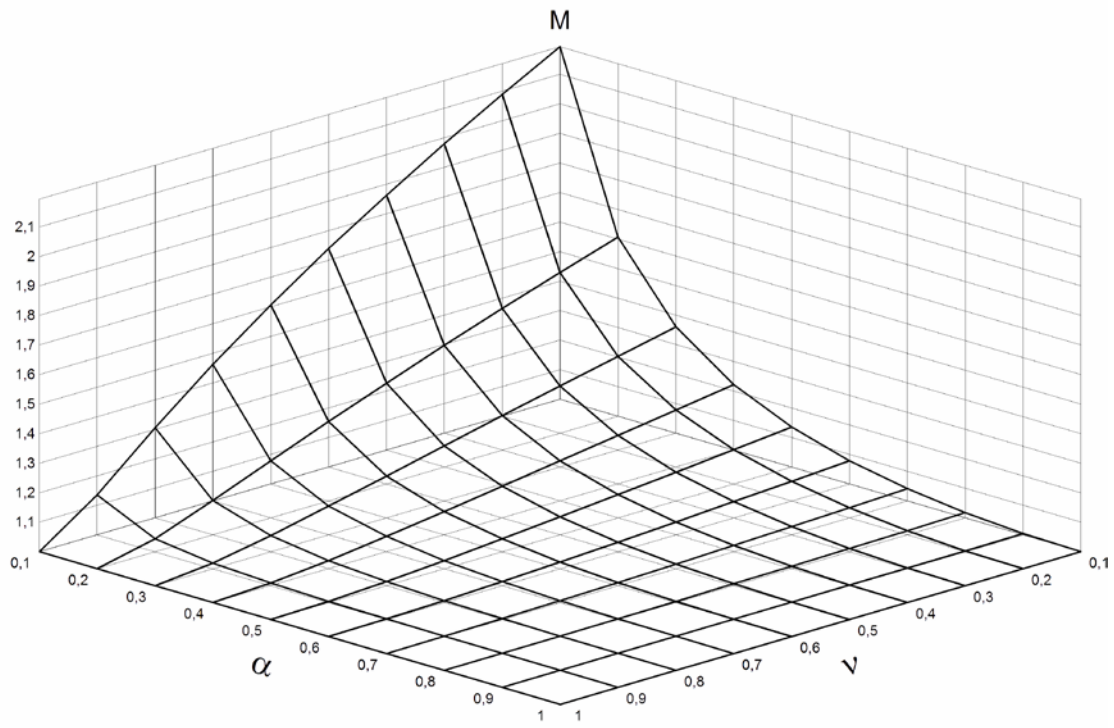

Рис. 5. График зависимости $M = f_1(\alpha, \nu)$.

В случае использования упреждающей коррекции, происходит изменение контурного коэффициента передачи, что отрицательно сказывается на характеристиках системы. Поэтому необходимо скомпенсировать снижение этого коэффициента. Компенсирующая цепь (рис. 6) изменяет уровень задающего сигнала $U_{ЗАД}$ в зависимости от уровня сигнала упреждающей коррекции. Быстродействие этой цепи должно быть ниже, чем в контуре регулирования тока, чтобы не влиять на его динамические характеристики.

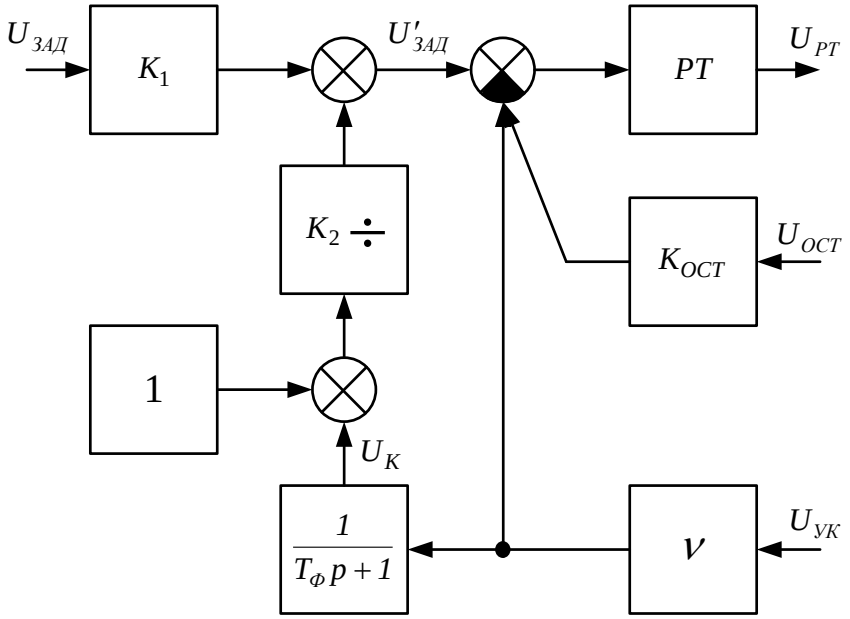

Рис. 6. Схема компенсирующей цепи упреждающей коррекции.

Работа компенсирующей цепи происходит следующим образом. В процессе работы R_H снижается, что приводит к уменьшению α. Это приводит к возрастанию контурного коэффициента системы. Для восстановления значения выходной координаты необходимо изменить $U'_{ЗАД}$. Компенсирующая цепь выполняет эту задачу в соответствии с формулой

$$U'_{ЗАД} = U_{ЗАД}\left(K_1 + \frac{K_2}{1+U_K}\right),$$

где $U_K = \frac{1}{T_Ф p+1}\nu\left(\frac{K_{МОД}}{T_{МОД}p+1} - \frac{K_H}{T_H p+1}\right)\Bigg|_{P=0} = \nu R_{НРРА}(1-\alpha)$.

Из выражения $U'_{ЗАД}$ видно, что компенсирующая цепь позволяет восстановить исходный коэффициент системы.

На рис. 7 представлен 3D-график изменения коэффициента K в зависимости от параметров α и ν. Из графика видно, что:

– снижение α приводит к существенному увеличению K;

– снижение ν позволяет сделать K близким к 1.

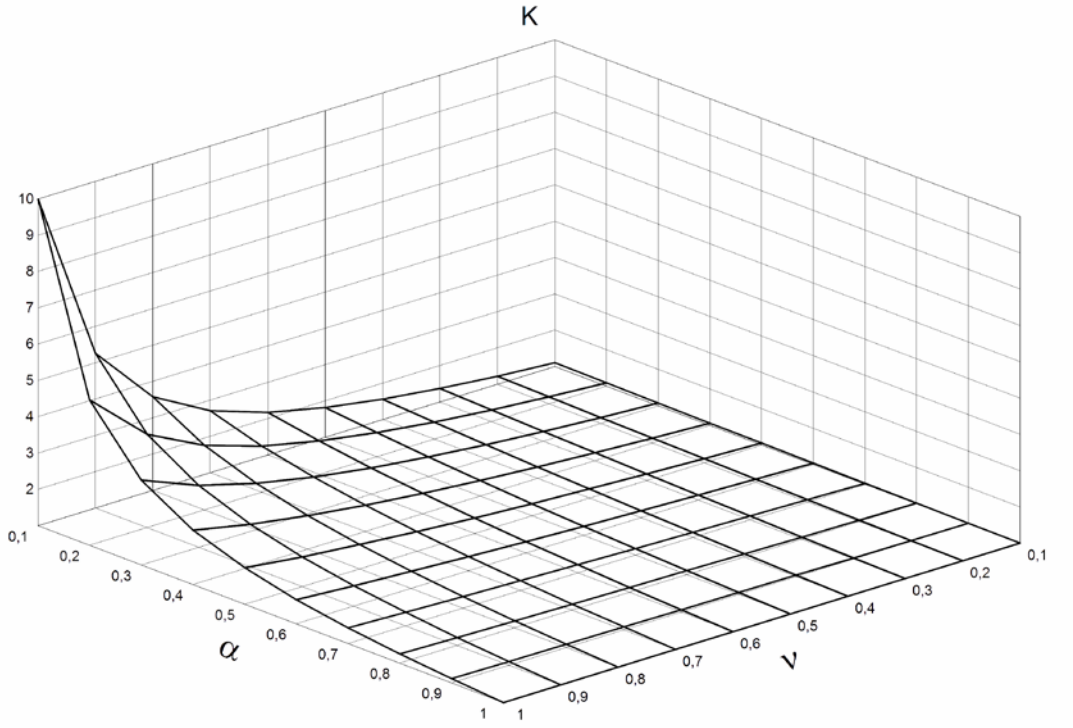

Рис. 7. График зависимости $K = f_2(\alpha,\nu)$.

Сравнение рис. 5 и 7 позволяет дать рекомендации по выбору ν (значение α зависит от режима работы и является параметрическим возмущением):

– следует снизить значение ν, при этом возрастает максимальное значение колебательности, а максимальное увеличение коэффициента снижается;

– ограничить, по возможности, диапазон изменения α.

Из таблицы 1 можно выбрать подходящее значение ν.

Таблица 1

ν	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
M_{MAX}	1	1,14	1,3	1,46	1,6	1,73	1,86
K_{MAX}	10	5,3	3,6	2,7	2,2	1,8	1,6

В процессе ручной электродуговой сварки человек становится звеном технологического процесса, а именно обеспечивает стабильность горения дуги (поддерживает длину дугового промежутка в допустимых пределах). Таким образом, человек оказывается включенным в контур управления и его параметры влияют на показатели сварки: производительность, качество шва и т.д. Исследователи отмечают, что переходный процесс (реакция человека) представляет собой случайную функцию, которая характеризуется математическим ожиданием (μ) и среднеквадратическим отклонением (σ). Выделяются следующие этапы переходного процесса:

– время реакции (запаздывание) – случайная величина с большой дисперсией $\mu \approx 0{,}24 - 0{,}25$ с, $\sigma = 0{,}05 - 0{,}07$ с;

– время первого движения (с момента начала движения до первого максимума);

– время коррекции (устранение ошибки при первом движении).

Применение информационного подхода позволяет создать линейную модель $W_1(p)$ человека оператора для режима слежения (рис. 8). Оператор получает зрительную информацию, на принятие решения требуется время, которое отражается постоянной времени T_2 звена $W_2(p)$. Человек стремится компенсировать эту инерционность, что отражается форсирующей составляющей с постоянной времени T_2'. У квалифицированного (тренированного) оператора можно принять $T_2 \approx T_2'$.

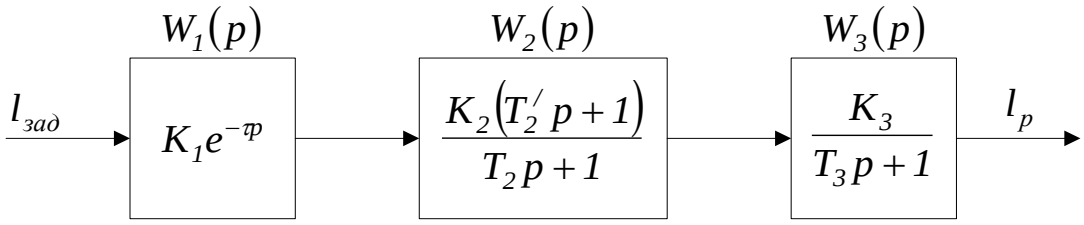

Рис. 8. Структурная схема оператора.

Скрытый период реакции оператора может быть оценен следующей передаточной функцией

$$W(p) \approx K_1 K_2 e^{-\tau p}.$$

Передаточная функция, соответствующая моторной реакции человека, представляется апериодическим звеном $W_3(p)$ с постоянной времени $0{,}1 < T_3 < 1$ с.

В соответствии с рис. 8 передаточная функция оператора принимает вид

$$W(p) = \frac{K_1 K_2 K_3 (T_2' p + 1) e^{-\tau p}}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}.$$

Исследования математической модели оператора позволяют сделать следующие выводы:

– можно составить модель с довольно высокой точностью для осредненных по времени действий для конкретного входного сигнала и определенного объекта управления;

– изменение сигнала или объекта влечет за собой изменение величины параметров, а иногда – и передаточной функции модели.

В свою очередь человек-оператор воспринимает информацию о режиме процесса сварки визуально и оценивает длину дуги и косвенно ток. Переходя к записи в приращениях исходных уравнений можно составить структурную схему линеаризованной системы.

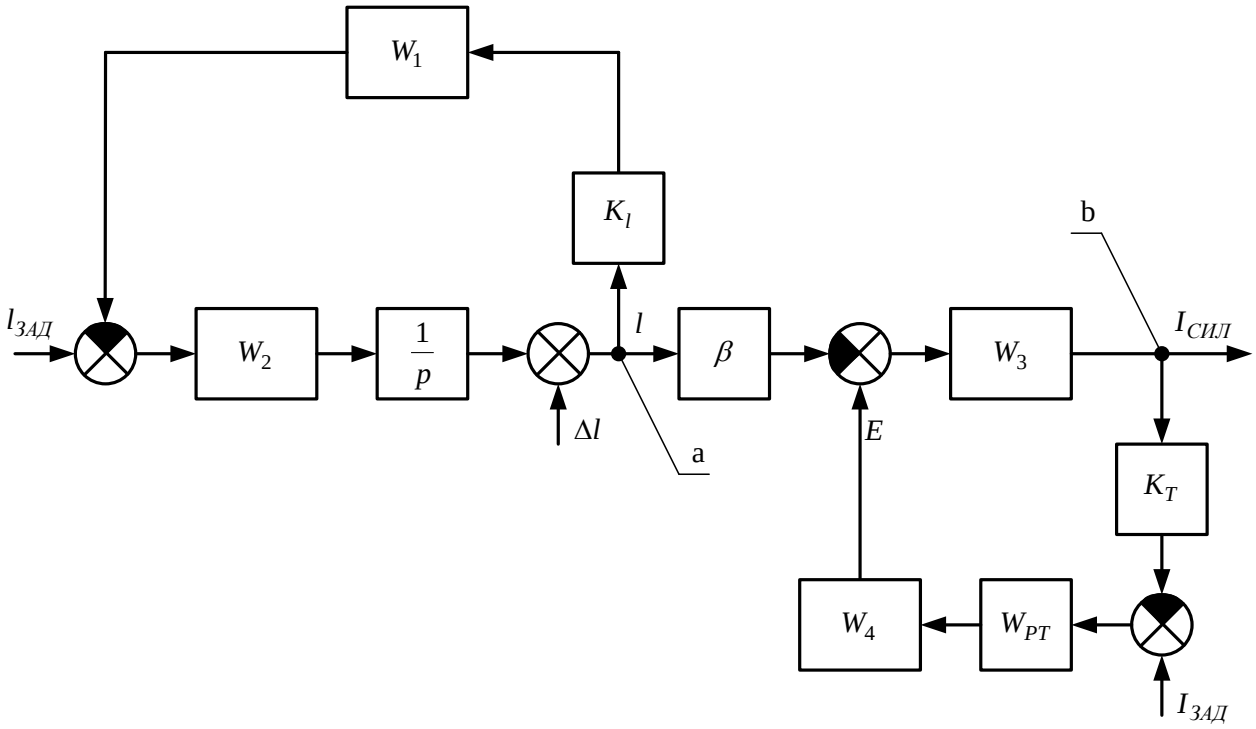

Рис. 9. Структурная схема линеаризованной системы

где W_1, W_2 – передаточные функции, характеризующие оператора; K_l, – коэффициент обратной связи визуального восприятия; W_3 – передаточная функция процесса электродуговой сварки; W_4 – передаточная функция инвертора; W_{PT} – передаточная функция регулятора тока; K_T – коэффициент передачи датчика тока.

Настраивая контур стабилизации тока, включающего звенья W_3, W_4, W_{PT} и K_T на требуемый оптимум и рассматривая передаточную функцию структуры (рис. 9) от точки **a** до точки **b** можно записать:

$$W_{ab}(p) = \frac{\beta / R_Д}{T_Э p + K},$$

где K – коэффициент передачи звена W_{ab}; $T_Э$ – его постоянная времени.

Конкретные значения этих величин могут быть заданы с помощью регулятора W_{PT}. Упрощенная структурная схема линеаризованной системы принимает вид (рис. 10).

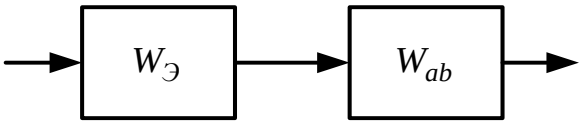

Рис. 10. Упрощенная структурная схема

Эквивалентная передаточная функция $W_Э$ имеет вид

$$W_Э(p) = \frac{1}{\tau p^2 + p + K_l},$$

где $\tau = T_1 + T_2$ - суммарная постоянная времени реакции оператора.

Передаточная функция системы описывается выражением:

$$W(p) = \frac{\beta / R_Д}{(T_Э p + K)(\tau p^2 + p + K_l)}$$

В реальных системах кроме детерминированных сигналов всегда присутствуют сигналы, имеющие случайный характер. Одним из критериев качества можно считать уровень дисперсии выходного сигнала при воздействии на систему случайного процесса. В рассматриваемом случае в качестве случайной составляющей выступает Δl - изменение длины дуги. Причинами этого могут быть неравномерности кромок свариваемых деталей, расход электрода, дрожание (вибрация) электрода. Анализируя рассматриваемую структуру с точки зрения влияния случайного сигнала Δl, передаточная функция системы для этого режима принимает вид

$$W_{\Delta l}(p) = \frac{(\tau p^2 + p)\beta / R_Д}{\tau T_Э p^3 + (T_Э + \tau K)p^2 + (K_l T_Э + K)p + K_l K}.$$

Будем считать, что помеха – центрированный случайный сигнал, типа «белый шум», т.е. $m = 0$ - математическое ожидание; $S(\omega) = N$ - спектральная плотность;

В диссертации анализируется возможность минимизации дисперсии рассматриваемой системы. В подобных задачах дисперсия определяется табличным значением интеграла I_X. Для исследуемой системы

$$I_X = \left(\frac{\beta}{R_Д}\right)^2 \frac{\tau K_l K + T_Э}{2T_Э\left[(K_l T_Э + K)(T_Э + \tau K) - K_l K \tau T_Э\right]}$$

Оценим возможность снижения (минимизации) I_X в зависимости от параметров передаточной функции. Для этого необходимо найти экстремум функции I_X для соответствующих переменных по формуле $\frac{dI_X}{dX} = 0$.

Если условие не выполнимо, то соответствующая функция монотонна (не имеет экстремума).

При соблюдении условия $K_l T_Э + K_l K = K$ будет достигаться минимум дисперсии выходного сигнала при вариации параметра T_1.

Для остальных параметров функция I_X является монотонной – снижается с ростом K и $T_Э$.

Для достижения оптимального режима работы с участием конкретного оператора и автоматического снижения чувствительности к параметрическим возмущениям, и как следствие снижение уровня дисперсии силового тока, разработан адаптивный регулятор. Уровень дисперсии тока можно оценить, используя следующую схему.

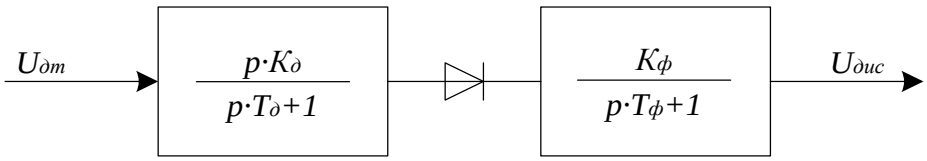

Рис. 11. Схема оценки дисперсии тока

где $U_{дт}$ – напряжение датчика тока; $K_д$ – коэффициент передачи реального дифференцирующего звена; $T_д$ – постоянная времени реального дифференцирующего звена; $K_ф$ – коэффициент передачи фильтра; $T_ф$ – постоянная времени фильтра.

Аналоговая реализация вычислителя приведена на рис. 12.

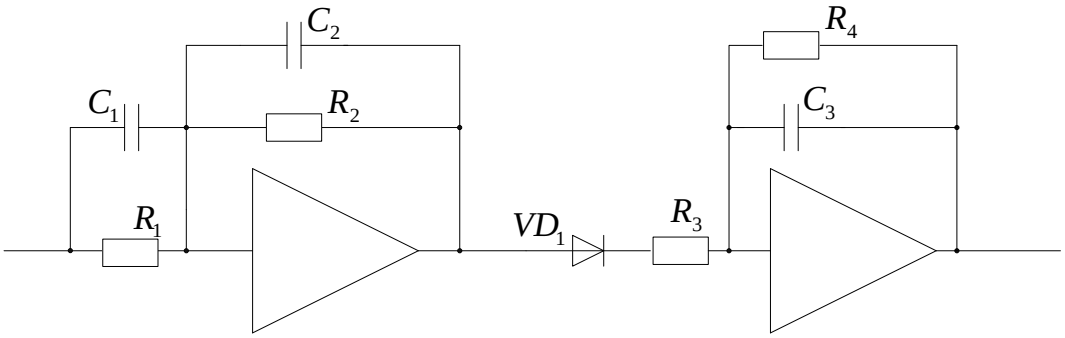

Рис. 12. Аналоговая реализация вычислителя

Для анализа влияния параметров устройства на точность преобразований сигнала были проведены исследования для различных значений $T_ф$ и $T_д$, результаты которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

$T_д$, с	0,01	0,01	0,01	0,02	0,005
$T_ф$, с	1,0	0,5	2,0	1,0	1,0
Δ, %	±1	±2,5	±2	±3	±0,6

На выходе схемы сигнал $U_{дис}$ характеризует уровень дисперсии тока $I_д$.

Этот сигнал является управляющим для схемы адаптивного регулятора, блок схема которого приведена на рис. 13. При отсутствии $I_д$ сигнал $U_{дис}$=0 и схема запуска удерживает адаптивный регулятор в состоянии T_1=T_{10}, T_2=T_{20}, где T_{10} и T_{20} начальные значения постоянных времени регулятора, заданные в середине диапазона

регулирования, что позволяет изменять их в сторону уменьшения или увеличения. При появлении тока $I_д$ сигнал $U_{дис}>0$, срабатывает схема запуска, которая включает в работу генератор тактовых импульсов. Звено выборки хранения обеспечивает временную задержку сигнала, поэтому на вход компаратора поступают дисперсии текущего (b) и предшествующего (a) такта. На выходе компаратора формируются два сигнала, условно (+) и (-) в зависимости от соотношения дисперсий на контролируемых тактах. Это позволяет управлять реверсивным счетчиком (РС).

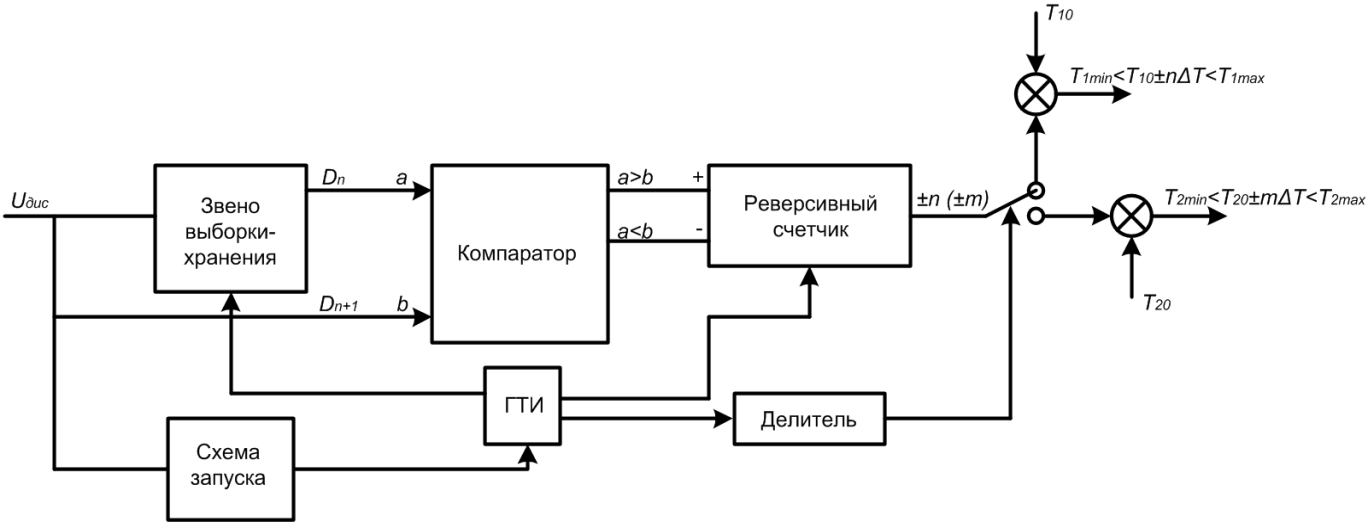

Рис. 13. Схема адаптивного регулятора тока

Выход счетчика коммутируется сигналом делителя импульсов. По этому первые n тактов РС управляют изменением (настройкой) постоянной времени T_1, последующие m тактов – настройкой постоянной времени T_2. Затем цикл повторяется. Это позволяет выполнить (реализовать) непрерывную адаптивную схемы по текущим значениям дисперсии.

В результате можно сделать следующие выводы:

– человек является звеном технологического процесса ручной электродуговой сварки и его характеристики оказывают влияние на показатели сварки;

– возможно выполнить адаптацию сварочного инвертора за счет регулировки $T_Э$ и K под конкретного оператора, что позволит снизить дисперсию силового тока, что в свою очередь снизит число обрывов дуги и технологических коротких замыканий.

Четвертая глава. Эксперимент (моделирование). В процессе эксперимента моделировалась работа сварочного инвертора с адаптивным регулятором, с учетом разработанных решений по снижению чувствительности к колебаниям нагрузки. Ниже приведены график тока сварочной дуги, годограф, характеризующий поиск экстремума и значение СКО в процессе сварки, рис. 14 - 16 соответственно.

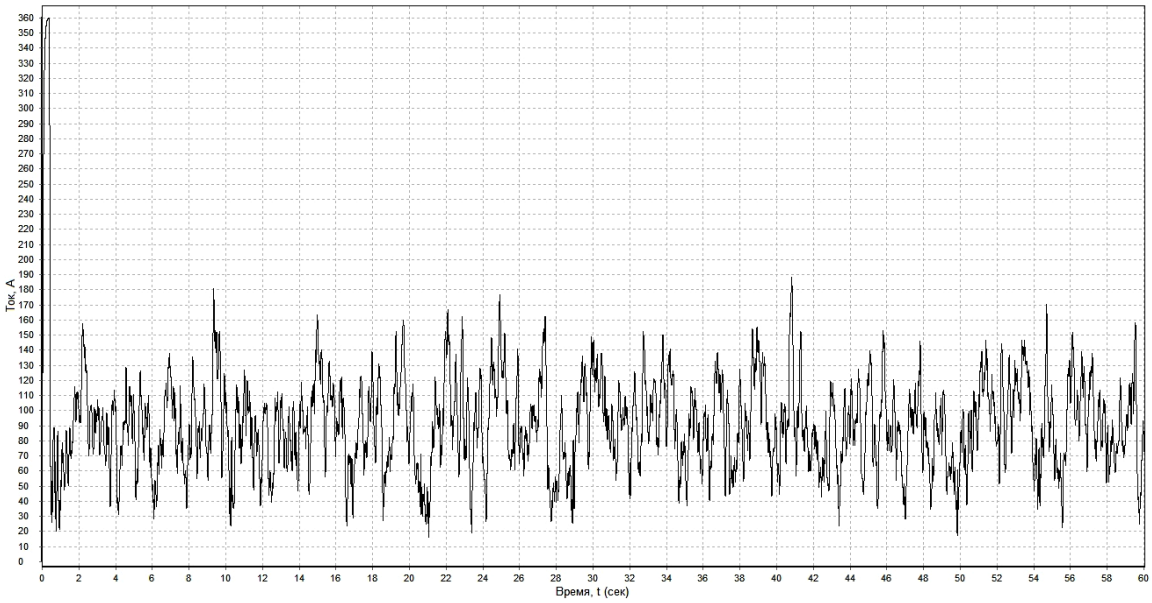

Рис. 14. График тока сварочной дуги при работе с блоком адаптации.

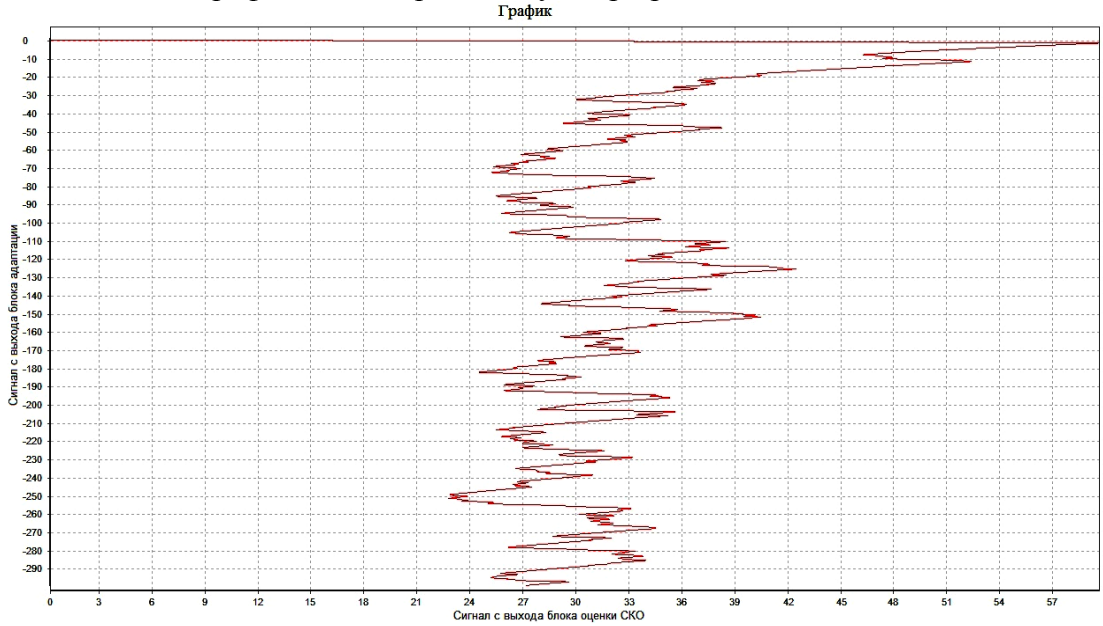

Рис. 15. Годограф, характеризующий поиск экстремума.

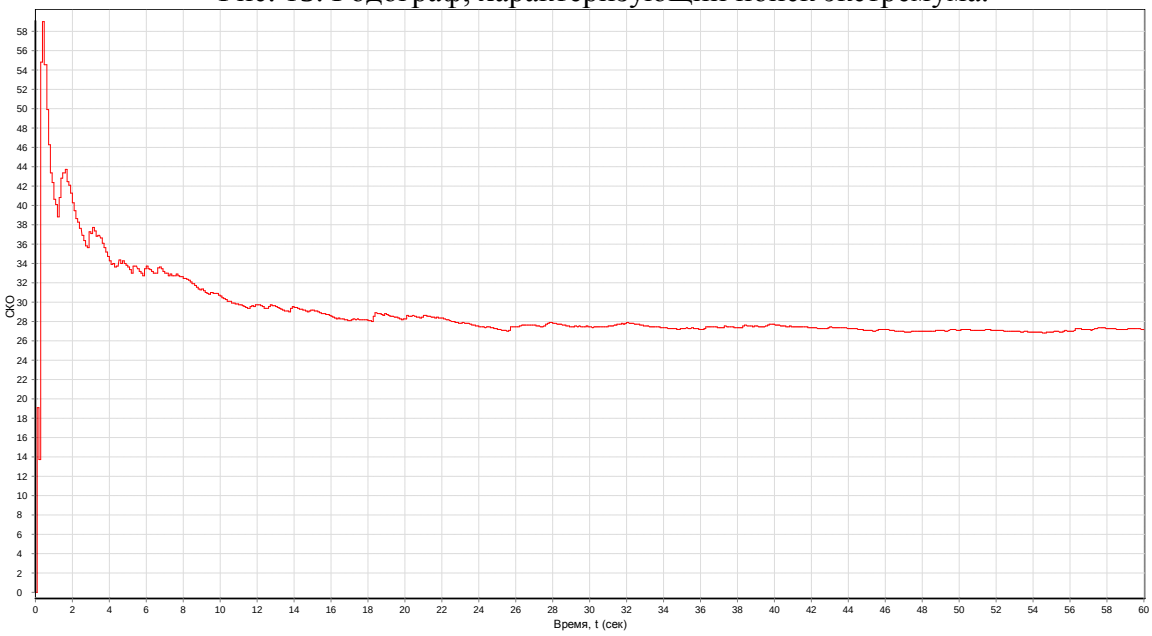

Рис. 16. Значение СКО в процессе сварки с адаптивным регулятором.

По результатам диссертационного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ существующих систем управления и методов построения инверторных систем, в том числе и систем с низкой чувствительностью.

2. Определены пути снижения чувствительности к параметрическим изменениям с сохранением основных качественных характеристик за счет более полного использования информации о процессе и звеньях системы.

3. Разработаны элементы системы управления:

- вычислитель параметров случайного сигнала;
- адаптивный регулятор тока.

Приведено описание работы данных элементов, и определены основные параметры системы.

4. Разработана методика синтеза системы, позволяющая учитывать человека-оператора как звено автоматического регулирования.

5. Предложен новый алгоритм снижения чувствительности системы управления процессом сварки к параметрическим изменениям за счет применения упреждающей коррекции и введения в контур регулирования адаптивного регулятора, снижающего влияние человека-оператора на динамику системы.

6. Показана согласованность результатов экспериментального исследования, проведенного над моделями, с результатами экспериментального исследования на макете.

В **приложении** представлен листинг программы адаптивного регулятора системы управления источником сварочного тока.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в виде учебного пособия для бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» 13.03.02.

Научная работа Мишина А.В. отмечена: дипломом Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа, 2009 г.; дипломом Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа, 2010 г.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Мишин, А. В. Мобильное зарядное устройство для электромобиля / А. В. Мишин [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2010. – №1. – С. 23-26.

2. Мишин, А. В. Анализ системы управления инвертором тока / А. В. Мишин, В. И. Доманов, А. В. Доманов, // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – №1. – С. 9-12.

3. Мишин, А. В. Автоматизированный электропривод автономного транспортного средства / А. В. Мишин [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – №6. – С. 33-35.

4. Мишин, А. В. Анализ и синтез системы управления сварочным инвертором / А. В. Мишин, А. В. Доманов, В. И. Доманов, // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2013. – №10. – С. 3-8.

5. Мишин А.В. Разработка системы управления электросварочным оборудованием / А. В. Мишин [и др.] // Сварочное производство. – 2015. – №4. – С. 25-28.

Патенты РФ:

6. Пат. 97880 Российская федерация МПК H02J7/10. Малогабаритное зарядное устройство / Доманов В.И., Доманов А.В., Мишин А.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU). - №2010114696/07; заявл. 13.04.2010; опубл. 20.09.2010.

7. Пат. 2470451 Российская федерация МПК H02M7/5387. Однофазный полумостовой транзисторный инвертор / Доманов В.И., Мишин А.В., Мишин Н.В., заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU). - № 2011144255/07 заявл. 01.11.2011; опубл. 20.12.2012.

8. Пат. 2529871 Российская федерация МПК H02M7/00, H02M7/538. Адаптивный регулятор сварочного тока / Доманов В.И., Мишин А.В.; Доманов А.В., заявитель и патентообладатель ООО «Центр энергетических технологий» (RU). - № 2013127694/07, заявл. 18.06.2013; опубл. 10.10.2014.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

9. Свидетельство № 1410 о регистрации программно-информационного продукта. Программа адаптивного регулятора системы управления источником сварочного тока / Доманов В.И., Доманов А.В., Мишин А.В., Муллин И.Ю., правообладатель «Ульяновский государственный технический университет. Ульяновский областной центр новых информационных технологий. Областной фонд алгоритмов и программ». – URL: http://ofap.ulstu.ru/1410 ; зарег. 12.03.2015.

10. Свидетельство о государственной регистрации программ ЭВМ № 2015617048 Российская федерация. Программа адаптивного регулятора системы управления сварочным инвертором / Доманов В.И., Доманов А.В., Мишин А.В., правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет». - № 2015613887 ; заявл. 12.05.2015, опубл. 20.07.2015.

В других изданиях:

11. Мишин, А. В. Универсальные инверторные источники тока / Материалы 17 Всеукраинской студенческой научно-технической конференции г. Севастополь, 19-21 марта 2012 г. – С. 84-85.

12. Мишин, А. В. Мобильное зарядное устройство для электромобиля / А. В. Мишин [и др.] // Вестник УлГТУ. – 2009. – №4. – С. 30-33.

13. Мишин, А. В. Система управления инвертором тока / В. И. Доманов, А. В. Доманов // Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы. Том 1. Международная научно-практическая конференция (Россия, г. Ульяновск, 22-25 мая 2012 г.) – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 103-105.

14. Мишин А. В. Управление энергоэффективным автономным инвертором тока / В. И. Доманов, А. В. Доманов // Труды VII Международной (XVII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу : ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – С. 341-345.

15. Мишин А. В. Исследование электротехнических инверторов тока / В. И. Доманов, Р. Н. Багаутдинов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу : ФГБОУВПО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева». – Саранск, 2014. – С. 318-322.

16. Мишин, А. В. Высокоэффективные универсальные источники тока / Ульяновский центр трансферта технологий: Сборник аннотаций проектов Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа (УлГТУ, 12-14 мая 2010 г.) – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 187-188.

17. Мишин, А. В. Высокоэффективный сварочный инвертор / Ульяновский центр трансфера технологий : Сборник аннотаций проектов молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа (УлГТУ, 12-14 мая 2010 г.), Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 296-297.

18. Мишин, А. В. Исследование инверторов тока с низкой чувствительностью к колебаниям нагрузки / А. В. Мишин, В. И. Доманов // Электротехнические и электромеханические системы: Материалы XX-й крымской студ. научно-техн. конференции, г. Севастополь, 19-21 мая 2015 – Севастополь: СевГУ, 2015 – С. 85-87.

Мишин Алексей Владимирович
Разработка и исследование элементов системы управления сварочным инвертором с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям
Автореферат

Подписано в печать 29.12.2015. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,40 Тираж 100 экз. Заказ 1121.
ИПК «Венец» УлГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.