

# Устройства аналоговой и цифровой электроники

УДК 621.314 + 681.51.01

## ЧАСТОТНО-ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ АДАПТИВНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

*М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Л.И. Цытович, А.В. Тюгаев*

Рассматривается принцип построения регулятора переменного напряжения с частотно-широотно-импульсной модуляцией, способного адаптироваться к нестационарным параметрам источника электропитания. Приведена структура системы управления и ее временные диаграммы сигналов. Показано, что подобного рода регуляторы имеют практически неограниченный диапазон регулирования, повышенную точность и помехоустойчивость, обусловленную применением в алгоритме управления метода интегрирующего развертывающего преобразования. Разработана система управления сушильной камерой, в состав которой входит адаптивный регулятор переменного напряжения и система «непрерывного» контроля изоляции изделия, подвергаемого термообработке.

Статья предназначена для научных и инженерных работников, специализирующихся в области силовой преобразовательной техники, а также может представлять интерес для студентов энергетического направления.

*Ключевые слова:* регулятор переменного напряжения, частотно-широотно-импульсная модуляция, широко-импульсная модуляция, амплитудный модулятор, интегратор, релейный элемент.

### Введение

В системах терморегулирования, относящихся к разряду инерционных объектов регулирования, весьма эффективны тиристорные регуляторы переменного напряжения с частотно-широотно-импульсной модуляцией (ЧШИМ) [1–5], в основе управления которыми лежат принципы интегрирующего развертывающего преобразования [6–12]. Режим интегрирующей ЧШИМ обеспечивает широкий диапазон регулирования и повышенную помехоустойчивость и точность работы системы управления.

Ниже рассматривается разработанный на кафедре электропривода ЮУрГУ частотно-широотно-импульсный регулятор переменного напряжения (РПН) [13–17], который наряду с простотой технической реализации имеет высокую помехоустойчивость как со стороны информационного, так и синхронизирующего каналов управления, а также обладает способностью адаптироваться к нестационарным параметрам источника электропитания.

### Теоретическая часть

Структурная схема РПН (рис. 1) включает в себя интегрирующий развертывающий преобразователь РП с ЧШИМ на основе сумматоров  $\Sigma 1$ ,  $\Sigma 2$ , интегратора И, релейного элемента РЭ, инвертора Ин. и амплитудного модулятора АМ, а также устройства синхронизации УС-А, УС-В, УС-С с разделительным трансформатором ТУ, блок коррекции частоты БКЧ, формирователь-распределитель ФР импульсов управления на основе одновибратора

ОВ-А, ОВ-В, ОВ-С и D-триггеров Т1–Т3, а также блок силовых тиристоров БСТ с ключами переменного тока Кл.1–Кл.3, функцию которых выполняют симисторы или встречноключенные тиристоры. Там же на рис. 1 показана активная нагрузка Н, распределенная по фазам А, В, С.

Устройства синхронизации УС-А, УС-В, УС-С выполнены на базе последовательно включенных РП1, РП2 с выходным инвертором Ин.2 и амплитудными модуляторами АМ1, АМ2 и представляют собой каскадное интегрирующее УС с синхронизацией РП со стороны информационного входа, подробно рассмотренного в работах [18–20].

При выполнении условия  $(T_0)^{-1} = (T_C)^{-1}$  каждый из РП1, РП2 создает фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами  $-90$  эл. град (рис. 2, б, г). Здесь  $T_0 = 4\bar{b}T_{И}$  – период собственных автоколебаний РП1, РП2 при отсутствии синхронизирующего сигнала;  $\bar{b} = |b/A|$  – нормированная величина порогов переключения  $\pm b$  РЭ1, РЭ2 по отношению к их амплитуде выходных импульсов  $\pm A$ ;  $T_{И}$  – постоянная времени интегратора И.

В результате этого на выходе каскадных интегрирующих УС-А, УС-В, УС-С формируются логические сигналы, длительность которых соответствует «положительным» полуволнам напряжения сети соответствующих фаз (рис. 2, а, г, е, ж). При этом устройства синхронизации обладают высокой помехоустойчивостью как к гармоническим, так и к коммутационным помехам со стороны напряжения сети, а также способностью адап-

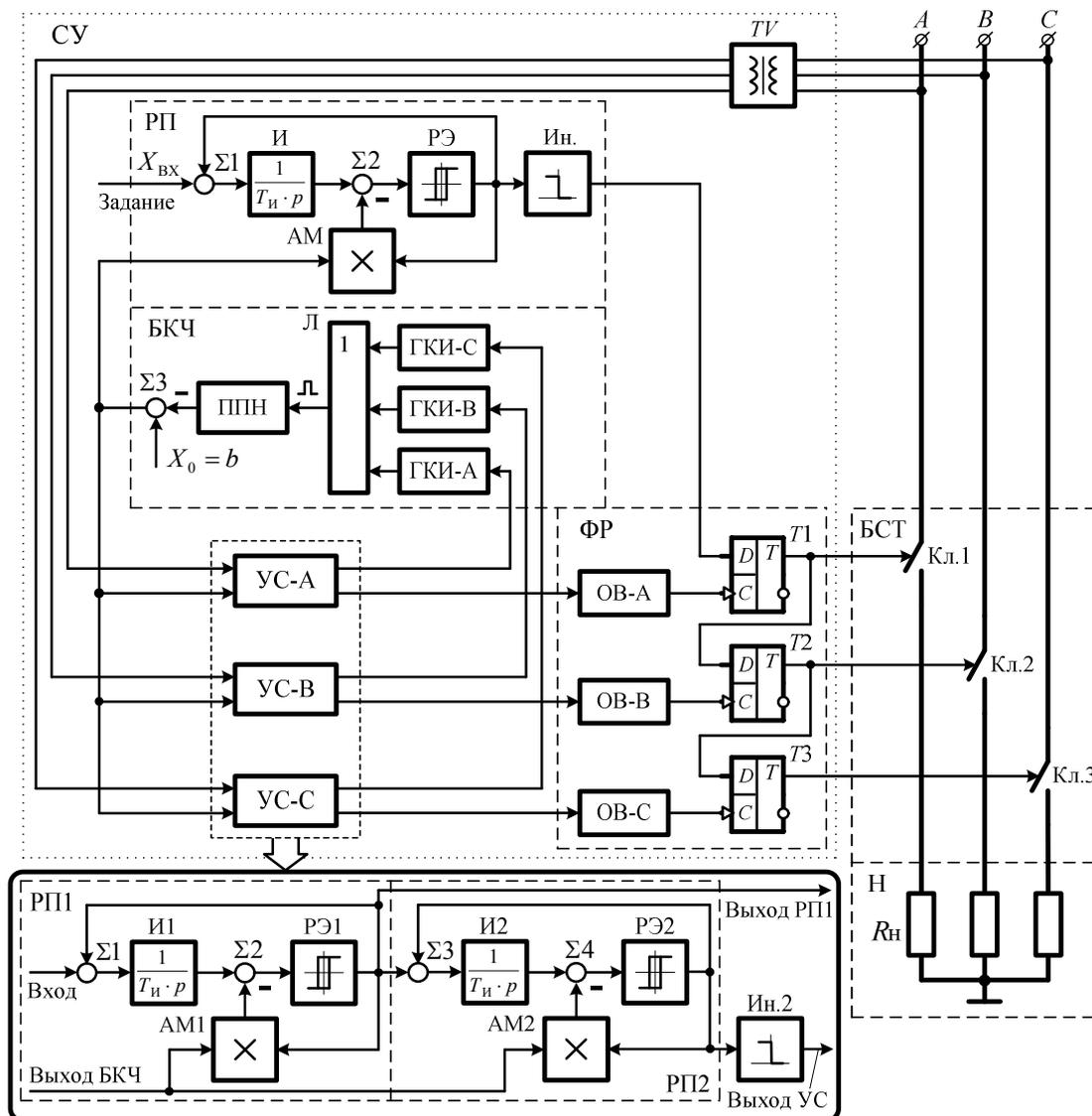


Рис. 1. Функциональная схема частотно-широтно-импульсного адаптивного регулятора переменного напряжения с интегрирующей системой управления

тироваться к колебаниям амплитуды напряжения сети [21–22], что является прямым следствием замкнутого характера структуры РП1, РП2 и наличия интегратора И в прямом канале регулирования (рис. 1).

Силовые ключи переменного тока Кл.1–Кл.3 работают в режиме частотно-широтно-импульсной модуляции с частотой  $f = (T)^{-1}$  выходных импульсов РП (рис. 2, и), равной  $f = f_0 \cdot (1 - \bar{X}_{ВХ}^2)$ . Здесь  $f_0 = 1/4bT_{и}$  – частота собственных автоколебаний РП при нулевом значении сигнала управления  $X_{ВХ}$ ;  $\bar{X}_{ВХ} = |X_{ВХ} / A|$  – нормированное значение входного сигнала управления  $X_{ВХ}$  по отношению к амплитуде  $\pm A$  импульсов на выходе РЭ (рис. 2, и). Частота собственных автоколебаний  $f_0$  РП выбирается на уровне долей–единиц Гц. Инвертор Ин.

служит для преобразования биполярных выходных импульсов РЭ (рис. 2, и) в однополярный сигнал (рис. 2, к), необходимый для последующего согласования с элементами цифровой электроники.

На выходе РПН формируются «пакеты» синусоидального напряжения сети «а», «b», «с» с целым числом периодов (см. рис. 2, л–н). Это оказывается возможным благодаря одновибраторам ОВ-А, ОВ-В, ОВ-С, которые генерируют короткие импульсы по переднему фронту сигнала с выходов УС-А, УС-В, УС-С (рис. 2, д, импульсы ОВ-В, ОВ-С не показаны) и D-триггерам Т1–Т3, формирующим импульсы управления для включения силовых ключей Кл.1–Кл.3 (рис. 2, л–н). При этом «пакеты» в каждой последующей фазе отстают от «пакеты» предыдущей фазы на 120 эл. град (рис. 2, л–н).

Регулировочная характеристика  $\gamma = f(\bar{X}_{ВХ})$  РПН с ЧШИМ является линейной и определяется

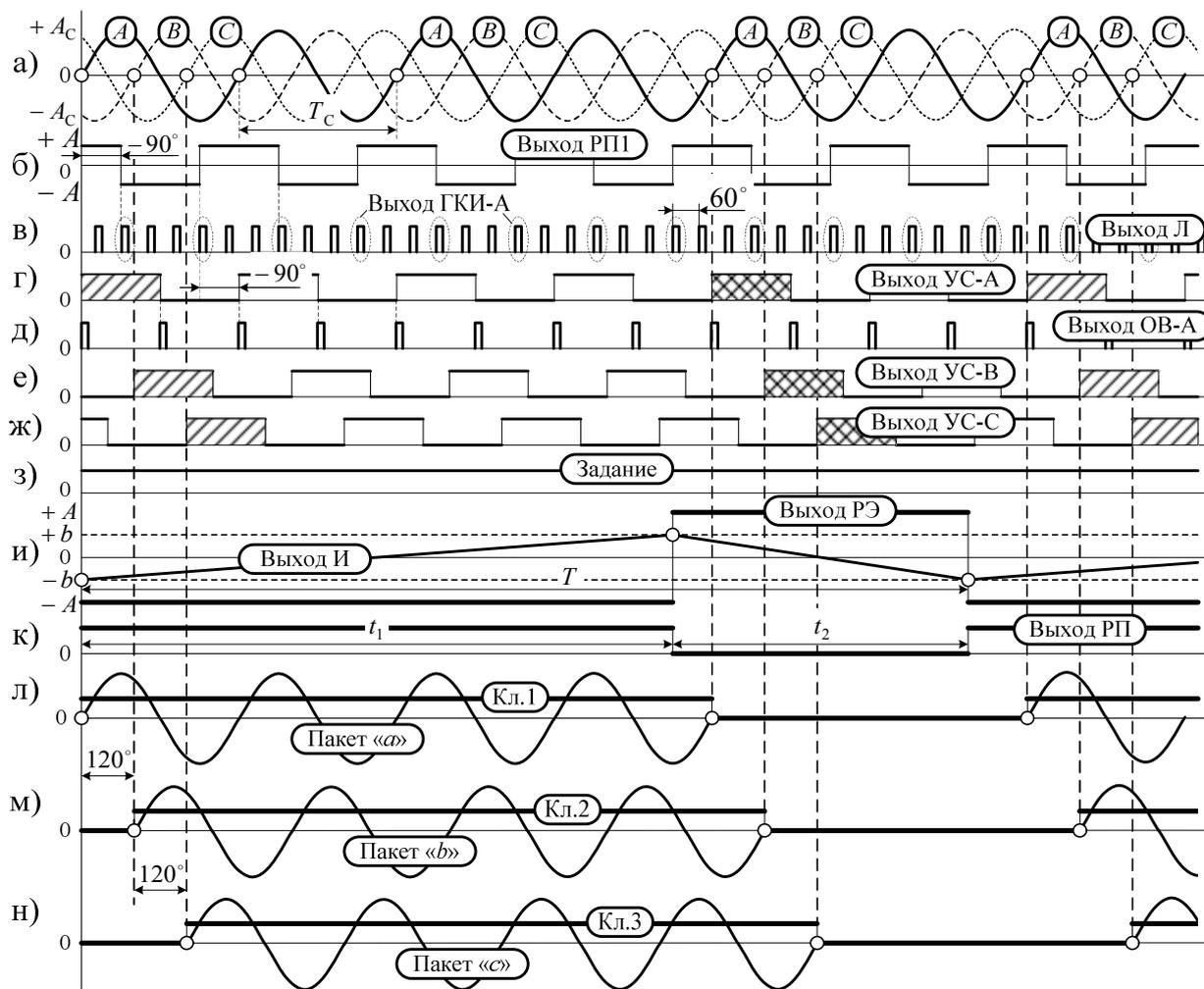


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов частотно-широтно-импульсного адаптивного регулятора переменного напряжения

из выражения  $\gamma = 0,5 \cdot (1 + \bar{X}_{ВХ})$ , где  $\gamma = t_1 / T$  – коэффициент заполнения или относительное время включения  $t_1$  силовых ключей Кл.1–Кл.3 по отношению к периоду  $T$  импульсов на выходе РП (рис. 2, и–к).

Применение режима ЧШИМ в РПН позволяет улучшить помехоустойчивость системы управления со стороны информационного входа за счет замкнутого характера структуры РП и наличия интегратора в прямом канале регулирования, а для силовых ключей получить фактически неограниченный диапазон регулирования. Действительно, при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) интервалы преобразования

$$t_1 = 0,5T_0 \cdot (1 + \bar{X}_{ВХ}), \quad t_2 = 0,5T_0 \cdot (1 - \bar{X}_{ВХ}),$$

$$T_0 = t_1 + t_2, \quad (1)$$

где  $T_0$  – период импульсов при ШИМ, который является величиной постоянной.

В случае ЧШИМ

$$t_1 = 0,5T_0 / (1 - \bar{X}_{ВХ}), \quad t_2 = 0,5T_0 / (1 + \bar{X}_{ВХ}),$$

$$T = T_0 / (1 - \bar{X}_{ВХ}^2). \quad (2)$$

Тогда диапазон регулирования

$$D_{ШИМ} = t_2 / T_0 = 0,5 \cdot (1 - \bar{X}_{ВХ}) \quad (3)$$

для силовых ключей при ШИМ заведомо ограничен величиной входного сигнала  $\bar{X}_{ВХ}$ , так как  $D \neq 0$ , а для ЧШИМ

$$D_{ЧШИМ} = t_2 / T_0 = 0,5 / (1 + \bar{X}_{ВХ}) \quad (4)$$

практически неограничен.

Приведенные соотношения (1)–(4) не учитывают дискретность РПН, которая равна одному периоду  $T_c$  напряжения сети. При этом из-за не кратного соотношения частоты  $f = (T)^{-1}$  выходного сигнала РП (рис. 2, и) и частоты  $(T_c)^{-1}$  напряжения сети (рис. 2, а), неизбежно возникающего в системе с ЧШИМ при изменении сигнала управления  $X_{ВХ}$  (рис. 2, з), «пакеты» синусоидального напряжения «а», «b», «с», поступающие в нагрузку, могут отличаться друг от друга по количеству содержащихся в них периодов  $T_c$ . Однако данная ошибка дискретности не превышает одного периода  $T_c$  напряжения сети, носит периодический характер и, как показала практика, не оказывает

заметного влияния на показатели качества системы управления в целом.

Для адаптации системы управления к нестабильности частоты напряжения сети в систему управления РПН введен блок коррекции частоты БКЧ (рис. 1), состоящий из преобразователя значения периода в напряжение ППН, сумматора  $\Sigma$  с источником опорного напряжения  $X_0 = b$  и генераторов коротких импульсов ГКИ-А, ГКИ-В, ГКИ-С, которые формируют импульсы с малой длительностью по переднему и заднему фронтам сигнала с выхода РПН каскадных УС-А, УС-В, УС-С (рис. 2, б-в, импульсы ГКИ-В, ГКИ-С не показаны). Затем эти импульсы суммируются при помощи логического элемента Л типа «ЗИЛИ». В результате этого импульсы на выходе элемента Л следуют друг за другом через 60 эл. град (рис. 2, в), что позволяет достаточно быстро измерять частоту напряжения сети.

В интегрирующей системе управления регулятора переменного напряжения (рис. 1) БКЧ обеспечивает автоподстройку частоты собственных автоколебаний  $f_0 = 1/4bT_{\text{и}}$  во всех разветвляющих преобразователях при изменении частоты  $(T_C)^{-1}$  напряжения сети за счет коррекции порогов переключения  $\pm b$  в РП при помощи амплитудных модуляторов. В результате этого в УС-А, УС-В, УС-С всегда выполняется равенство между  $f_0$  и частотой сети  $(T_C)^{-1}$ , а их выходные импульсы в установившемся режиме работы всегда совпадают с моментами перехода фазных напряжений А, В, С через нулевой уровень. В РП с ЧШИМ (рис. 1) БКЧ также корректирует значение несущей частоты  $f_0$  так, что при

любом уровне входного сигнала управления  $X_{\text{вх}}$  и при изменении частоты сети  $(T_C)^{-1}$  на выходе РПН в «пакетах» всегда укладывается постоянное число периодов напряжения сети.

Следует отметить, что предложенный частотно-широотно-импульсный адаптивный РПН с интегрирующей системой управления (рис. 1) обладает простотой технической реализации и может работать как в трехфазном, так и в однофазном режимах, например, от фазы А без изменения его схемной конфигурации.

Таким образом, применение в рассматриваемой системе управления РПН методов интегрирующего разветвляющего преобразования позволило обеспечить высокий уровень ее эксплуатационной надежности в условиях нестационарных параметров напряжения сети и широкого частотного спектра внешних помех.

### Практическая часть

Частотно-широотно-импульсный регулятор переменного напряжения с интегрирующей системой управления (рис. 1) был внедрен в системе терморегулирования сушильной камеры 120ЕК-1 электроцеха ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» [23–24].

Сушильная камера СК предназначена для сушки электротехнических изделий (дросселей, трансформаторов, электродвигателей и пр.) с целью повышения их электрической прочности после ремонта.

В состав автоматизированной системы входят (рис. 3) непосредственно сушильная камера СК с

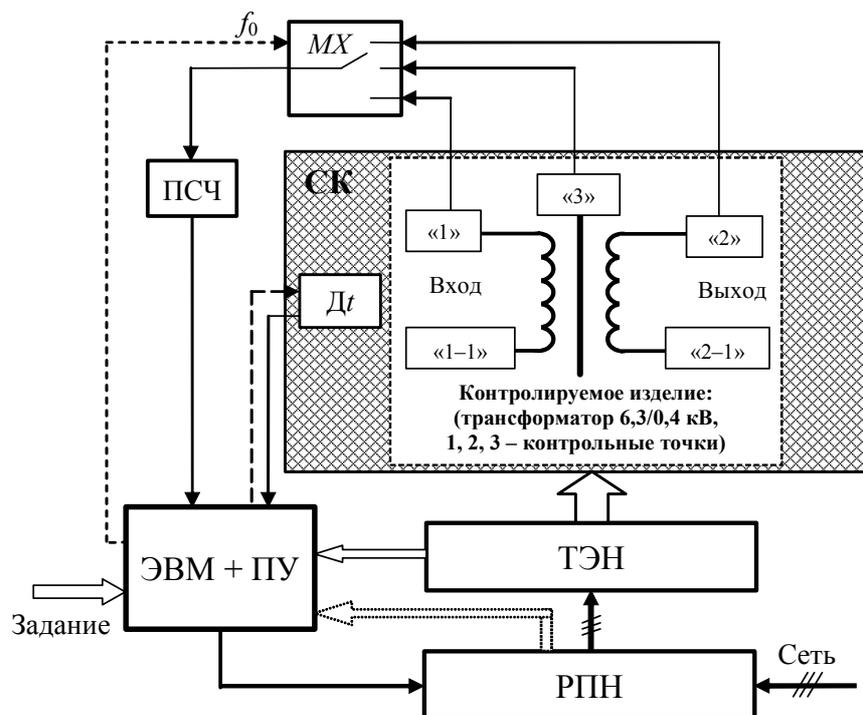


Рис. 3. Функциональная схема системы управления температурными режимами работы сушильной камеры 120ЕК-1 на Челябинском трубопрокатном заводе

боксом для размещения электротехнического изделия, датчик температуры  $D_t$ , теплоэлектронагреватели ТЭН, управляющая ЭВМ с периферийными устройствами ПУ ввода/вывода данных, силовой РПН, преобразователь значения сопротивления в частоту импульсов ПСЧ и синхронизированный с ЭВМ мультиплексор  $MX$ , предназначенный для подключения входа ПСЧ к контролируемым цепям изделия, подвергаемого сушке.

ЭВМ осуществляет функции ПИД-регулятора системы, корректора циклограммы процесса сушки изделия в функции значения сопротивления изоляции его токоведущих цепей, диагностику работоспособности  $D_t$ , ТЭН и РПН, а также аварийное отключение объекта при возникновении катастрофических отказов функциональных блоков.

Подключение ПСЧ к различным точкам контроля изоляции (например, первичная обмотка – корпус, вторичная обмотка – корпус или первичная обмотка – вторичная обмотка) производится с помощью мультиплексора  $MX$  (рис. 3), синхронизированного с тактовой частотой  $f_0$  ЭВМ.

В ходе технологического процесса сушки через заранее заданный интервал опроса экспериментально фиксируются и заносятся в «память» ЭВМ частота выходных импульсов ПСЧ и соответствующее ей значение сопротивления изоляции обмоток трансформатора. Контрольные измерения проводятся между точками «1–2», «1–3» и «2–3» (рис. 3). При этом вторые выводы «1–1» и «2–1» обмоток на первичной и вторичной сторонах трансформатора закорачиваются.

Введение системы «непрерывного» контроля сопротивления изоляции по сравнению с технологией «ручного» замера, как правило, присутствующей на объектах аналогичного функционального назначения, позволяет оптимизировать время сушки электротехнических изделий и сократить затраты на электроэнергию для сушильной камеры в пределах 15–20 %, причем, как показали последующие контрольные стендовые электротехнические испытания, без ущерба для качества работ.

### Выводы

1. Предложена структура адаптивного к нестабильности параметров источника электроснабжения – системы управления регулятором переменного напряжения с частотно-широотно-импульсной модуляцией, в основе которой лежит метод интегрирующего развертывающего преобразования.

2. Рассмотренный РПН отличается высокой точностью, помехоустойчивостью, широким диапазоном регулирования и простотой технической реализации. Приведены основные соотношения для интервалов следования импульсов при ШИМ и ЧШИМ.

3. Разработана система управления сушильной камерой, в состав которой входит адаптивный

РПН и система «непрерывного» контроля изоляции изделия, подвергаемого термообработке.

### Литература

1. Гельман, М.В. Тиристорные регуляторы переменного напряжения / М.В. Гельман, С.П. Лохов. – М.: Энергия, 1975. – 104 с.

2. Частотно-широотно-импульсный терморегулятор сушильной камеры с непрерывным тестированием сопротивления изоляции электротехнического изделия / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 16. – № 34 (251). – С. 50–55.

3. Брылина, О.Г. Многозонный частотно-широотно-импульсный регулятор переменного напряжения / О.Г. Брылина, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. – № 6 (42). – С. 35–39.

4. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 15. – № 15(232). – С. 40–45.

5. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 16. – № 34(251). – С. 21–27.

6. Интегрирующие развертывающие преобразователи с повышенной температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 10. – С. 38–43.

7. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 2 (34). – С. 35–41.

8. Аналого-цифровой преобразователь с интегрирующей синфазной амплитудно-частотно-импульсной модуляцией для систем вентильного электропривода / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин и др. // Электротехника. – 2013. – № 5. – С. 10–15.

9. Tsytoich, L.I. About the dynamics of some methods of integrating conversion of analog signal into digital code / L.I. Tsytoich, M.M. Dudkin, S.P. Lohov, O.G. Brylina // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Вып. 13. – № 1. – С. 80–91.

10. Дудкин, М.М. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широко-импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 4 (48). – С. 49–55.

11. Усынин, Ю.С. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // *Электротехника*. – 2013. – № 3. – С. 37–43.
12. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станков холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 107–110.
13. Пат. 2462804 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> Н 02 313/16. Частотно-широкоимпульсный регулятор переменного напряжения / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматуллин. – № 2011133127/07; заявл. 05.08.11; опубл. 27.09.12, Бюл. № 27.
14. Пат. 2490685 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> G 05 В 11/28, Н 052 М 5/293. Частотно-широкоимпульсный регулятор переменного напряжения с симметризованной нагрузкой / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.В. Тюгаев – № 2012134225/08; заявл. 09.08.12; опубл. 20.08.13, Бюл. № 23.
15. Пат. 2408969 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 М 5/293. Многозонный частотно-широкоимпульсный регулятор переменного напряжения / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.В. Качалов. – № 2009148024/07; заявл. 23.12.09; опубл. 10.01.11, Бюл. № 1.
16. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 38–41.
17. Параметрическая оптимизация частотнорегулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 30–33.
18. Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентильными преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматуллин // *Электротехника*. – 2013. – № 3. – С. 8–15.
19. Пат. 2383985 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 М 1/08. Устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматуллин. – № 2008142655/09; заявл. 27.10.08; опубл. 10.03.10, Бюл. № 7.
20. Пат. 2465709 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> Н 02 М 1/08. Устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Р.М. Рахматуллин. – № 2011141445/07; заявл. 12.10.11; опубл. 27.10.12, Бюл. № 30.
21. Качалов, А.В. Интегрирующие устройства синхронизации для систем импульсно-фазового управления вентильными преобразователями / А.В. Качалов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // *Практическая силовая электроника*. – 2010. – № 1 (37). – С. 42–51.
22. Дудкин, М.М. Элементы информационной электроники систем управления вентильными преобразователями: монография / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 362 с.
23. Система регулирования температуры и непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической обработки / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматуллин, О.Г. Брылина и др. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2012. – № 8. – С. 45–50.
24. Система непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической сушки / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматуллин, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин // *Промышленная энергетика*. – 2013. – № 1. – С. 24–28.

**Дудкин Максим Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-21, e-mail: dudkinmax@mail.ru

**Брылина Олеся Геннадьевна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-21, e-mail: teolge@mail.ru

**Цытович Леонид Игнатьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-85, e-mail: tsi@susu.ac.ru

**Тюгаев Антон Валерьевич**, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-21, e-mail: atuugaev@gmail.com

## PULSE-FREQUENCY-WIDTH ADAPTIVE ALTERNATING VOLTAGE REGULATOR WITH INTEGRATING CONTROL SYSTEM

*M.M. Dudkin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, dudkinmax@mail.ru*

*O.G. Brylina, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, teolge@mail.ru*

*L.I. Tsytoich, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, tsi@susu.ac.ru*

*A.V. Tyugaev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, atuygaev@gmail.com*

The principle of constructing the alternating voltage regulator with pulse-frequency-width modulation capable to adapt to non-stationary condition of electric power supply is considered. The structure of a control system and its timing waveform diagrams is reduced. It is shown, that such regulators have practically unlimited adjustment range, extended precision and noise stability due to application in the control algorithm of an integrating sweep conversion method. The control system of the drying camera, which consists of an adaptive alternating voltage regulator and continuous monitoring system of isolation of a product exposed to thermal processing is developed.

The paper is intended for the scientific and engineering workers specializing in the field of power converter engineering as well as can be of interest for the students of a power direction.

*Keywords: alternating voltage regulator, pulse-frequency-width modulation, pulse-width modulation, amplitude modulator, integrator, element relay.*

### References

1. Gelman M.V., Lokhov S.P. *Tiristornye regulatory peremennogo napryazheniya* [Thyristor Alternating Voltage Regulators], Moscow, 1975, 104 p.
2. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., Tyugaev A.V. Pulse-Frequency-Width Thermoregulator of the Drier Chamber With Continuous Testing of Isolation Resistance of the Electrotechnical Product, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2011, no. 34 (251), pp. 50–55.
3. Brylina O.G., Tsytoich L.I., Dudkin M.M. Multi-Zone Frequency-Pulse-Width Regulator Alternating Voltage, *Energobezopasnost i energosberezhenie [Energy-Safety and Energy-saving]*, 2011, no.6 (42), pp. 35–39.
4. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N. Bychkov A.E., Kashaev D.I., Moskov T.T. Energy saving in Electric Forced-Draft Mechanisms Multiply Objects, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2011, no.15 (232), pp. 40–45.
5. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N., Bychkov A.E., Belousov E.V. The Development of Methods for the Synthesis of Frequency Drives with Synchronous Electrical Machines, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2011, no. 34 (251), pp. 21–27.
6. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Tereshchina O.G., Loginova N.A. Integrating Sweep Converters with Heightened Temperature Stability of Performances, *Pribory i sistemy. Ypravlenie, control, diagnostika [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics]*, 2010, no. 10, pp. 38–43.
7. Tsytoich L.I., Rakhmatulin R.M., Dudkin M.M., Kachalov A.V. Reverse Thyristor Converter for Control Systems with an Electrical Mains Supply with Non-stationary Parameters, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2009, no.4 (34), pp. 35–41.
8. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., Tyugaev A.V. Analog-Digital Converter with Integrating In-Phase Amplitude-Frequency-Pulse Modulation for Switched Drive Systems, *Russian Electrical Engineering*, 2013, no.5, pp. 10–15.
9. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Lokhov S.P., Brylina O.G. About the Dynamics of Some Methods of Integrating Conversion of Analog Signal into Digital Code, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2013, no.1, pp. 80–91.
10. Dudkin M.M., Tsytoich L.I., Brylina O.G. Dynamic Spectral Performances of Sweep Converters with Pulse-Width Modulation, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2012, no.4 (48), pp. 49–55.
11. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N. The Valve Drive with Field Regulated Reluctance Machine, *Russian Electrical Engineering*, 2013, № 3, pp. 37–43.

12. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N. Lokhov S.P., Belousov E.V. Electric Drives with Field Regulated Reluctance Machine for Cold Rolling Mills, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2012, no.16 (275), pp. 107–110.

13. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. Pulse-Frequency-Width Alternating Voltage Regulator [Chastotno-shirotno-impulsnyy regulator peremennogo napryazheniya], patent 2462804 Russian Federation. decl. 05.08.11, publ. 27.09.12, bul. no.27.

14. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Tyugaev A.V. Pulse-Frequency-Width Alternating Voltage Regulator with Balanced Load [Chastotno-shirotno-impulsnyy regulator peremennogo napryazheniya s simetrirovannoy nagruzkoy], patent 2490685 Russian Federation. decl. 09.08.12, publ. 20.08.13, bul. no.23.

15. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Kachalov A.V. Multi-Zone Pulse-Frequency-Width Alternating Voltage Regulator [Mnogozonnyy chastotno-shirotno-impulsnyy regulator peremennogo napryazheniya], patent 2408969 Russian Federation. decl. 23.12.09, publ. 10.01.11, bul. no.1.

16. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N., Gladyshev S.P., Gorozhankina A.N. Synthesis of Electric Drive Control System with Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2012, no. 37 (296), pp. 38–41.

17. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N., Zhuravlev A.M., Lokhov S.P. Parametric Optimization of Variable Frequency Drives, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2012, no.37 (296), pp. 30–33.

18. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. Adaptive Interval-Code Binary-Decimal Integrating Synchronization of Control Systems of Power Valve Converters, *Russian Electrical Engineering*, 2013, no.3, pp. 8–15.

19. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Rakhmatulin R.M. Locker [Ustroyctvo sinkhronizatsii], patent 2383985 Russian Federation. decl. 27.10.08, publ. 10.03.10, bul. no.7.

20. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Rakhmatulin R.M. Locker [Ustroyctvo sinkhronizatsii], patent 2465709 Russian Federation. decl. 12.10.11, publ. 27.10.12, bul. no.30.

21. Kachalov A.V., Tsytoich L.I., Dudkin M.M. Integrating Lockers for Pulse-Phase Control Systems of Valve Converters, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2010, no.1 (37), pp. 42–51.

22. Dudkin M.M., Tsytoich L.I. *Elementy informatsionnoy elektroniki sistem upravleniya ventilnymi preobrazovatelyami: monografiya* [Elements of Informational Electronics of Control Systems of the Valve Converters: Monograph], Chelyabinsk, 2011, 362 p.

23. Tsytoich L.I., Rakhmatulin R.M., Brylina O.G., Dudkin M.M., Mylnikov A.Yu., Tyugaev V.A., Tyugaev A.V. Temperature Control Systems and Continuous of Insulation Resistance of Electrical Products in the Process of Heat Treatment, *Pribory i sistemy. Ypravlenie, control, diagnostika [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics]*, 2012, no.8, pp. 45–50.

24. Tsytoich L.I., Rakhmatulin R.M., Brylina O.G., Dudkin M.M. System of Continuous Control of Isolations Resistance of Electrotechnical Products at Drying of Their Thermal Processing, *Promyshlennaya energetika [Industrial Power Engineering]*, 2013, no.1, pp. 24–28.

*Поступила в редакцию 30.09.2013 г.*