

**МНОГОЗОННЫЙ ИНТЕГРИРУЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ, РАБОТАЮЩИЙ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ ПО ТОКУ**

В статье рассматривается принцип построения частотно-широотно-импульсного регулятора переменного напряжения, обеспечивающего надежную работу при перегрузках по току. Регулятор напряжения выполнен на базе многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя. Приведены структурные схемы регулятора и датчика тока, входящего в его состав. Показаны временные диаграммы, поясняющие принцип работы регулятора, в том числе при перегрузках по току.

**Ключевые слова:** регулятор переменного напряжения, многозонная модуляция, частотно-широотно-импульсная модуляция, релейный элемент, интегратор, динамический *D*-триггер, перегрузки по току.

**ВВЕДЕНИЕ**

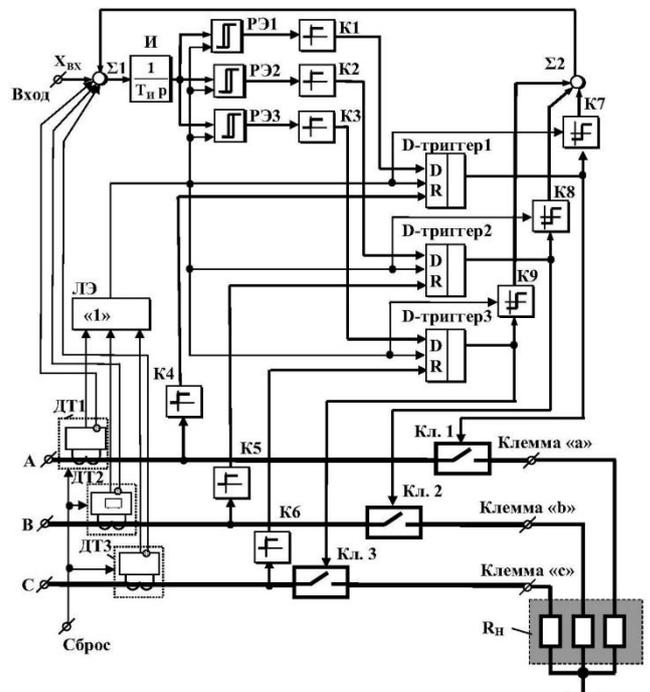
Как показали исследования, проведенные на кафедре электропривода ЮУрГУ, для большого класса устройств управления и, в частности, для систем терморегулирования перспективна многозонная частотно-широотно-импульсная модуляция (ЧШИМ), реализуемая с применением интегрирующих регуляторов напряжения РН [1-6]. При этом на нагрузке формируется «пакет» синусоидального напряжения, состоящий из целого числа периодов напряжения сети, относительная продолжительность которого определяется величиной сигнала управления [4]. Кроме того, в системах управления силовыми преобразователями всегда остаются актуальными вопросы защиты выходных цепей от перегрузок по току.

**СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**

Функциональная схема ЧШИМ регулятора переменного напряжения, надежно работающего при перегрузках по току, представлена на рис. 1 [7]. В его состав входит многозонный интегрирующий развертывающий преобразователь (МРП) на базе сумматора  $\Sigma 1$ , интегратора И с постоянной времени интегрирования  $T_{ин}$  и трех (по числу фаз напряжения сети) релейных элементов РЭ1-РЭ3 с симметричными относительно «нуля» порогами переключения, удовлетворяющих условию  $|\pm b_1| < |\pm b_2| < |\pm b_3|$ . Здесь индекс при «*b*» соответствует порядковому номеру РЭ. Амплитуда выходных импульсов каждого из РЭ $i$  меняется в пределах  $\pm A/3$  (рис. 2, в, д, е). Максимальный выходной сигнал МРП составляет  $\pm A$ . В режиме автоколебаний всегда находится РЭ с минимальным значением порогов переключения, т.е. в данном случае РЭ1. Остальные РЭ работают в статическом состоянии  $+A/3$  или  $-A/3$ . По мере увеличения входного сигнала МРП последовательно переходит из младшей  $\pm A/3$  в более старшую модуляционную зону. При этом выходные импульсы МРП складываются из импульсного потока текущей модуляционной зоны и постоянной составляющей предшествующих модуляционных зон. Подробно принцип действия МРП подробно рассмотрен в работах [8-12].

В состав РН также входят компараторы первой К1-К3, второй К4-К6 и третьей К7-К9 группы. К1-К3 предназначены для преобразования биполярных выходных импульсов РЭ1-РЭ3 в однополярный сигнал (рис. 2, з), что необходимо для стыковки МРП с динамическими *D*-триггерами *D*1-*D*3. Компараторы К4-К6

выполняют функции устройств синхронизации и переключаются в состояние логической «1» на интервалах времени, соответствующих положительной полуволне напряжения соответствующей фазы (рис. 2, а, б). Компараторы К7-К9 совместно с *D*-триггерами 1-3 и вторым сумматором  $\Sigma 2$  обеспечивают замкнутый контур регулирования «внутри» МРП (рис. 3).



**Рис. 1. Функциональная схема интегрирующего регулятора переменного напряжения**

Триггеры *D*1-*D*3 переключаются в состояние логической «1» (рис. 2, ж), задаваемой компараторами К1-К3 (см. рис. 2, в, з), по переднему фронту импульса с выхода компараторов К4-К6 (см. рис. 2, а, б).

Частота собственных автоколебаний МРП выбирается не менее чем на два порядка ниже частоты напряжения сети. При этом задержка, которую вносят триггеры *D*1-*D*3, является пренебрежимо малой величиной.

Силовые ключи Кл.1, Кл.2 и Кл.3, подключенные к фазам *A*, *B* и *C* соответственно, совместно с нагрузкой *R*<sub>н</sub> образуют силовую схему с нулевым выводом. В каждую из фаз *A*, *B*, *C* введены датчики тока ДТ1, ДТ2 и ДТ3 соответственно (рис. 4), образующие контур отрицательной обратной связи по току нагрузки. Статическая характеристика «вход-выход» ДТ1-ДТ3 линейная с заданным коэффициентом передачи во всем

диапазоне изменения входной координаты.

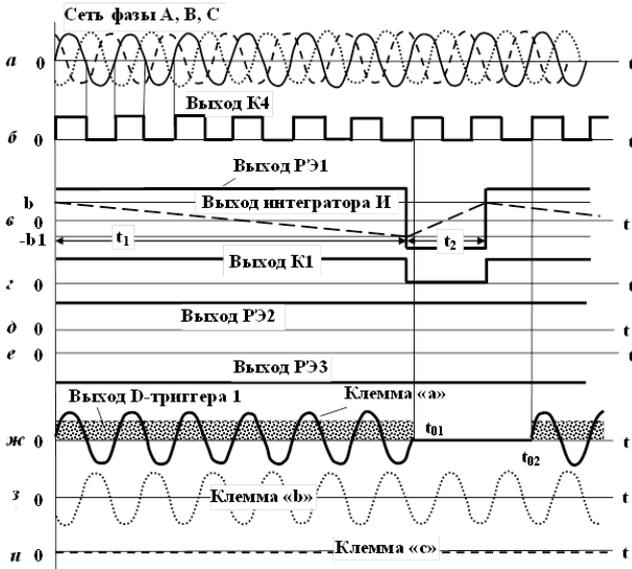


Рис. 2. Временные диаграммы к пояснению принципа работы РН

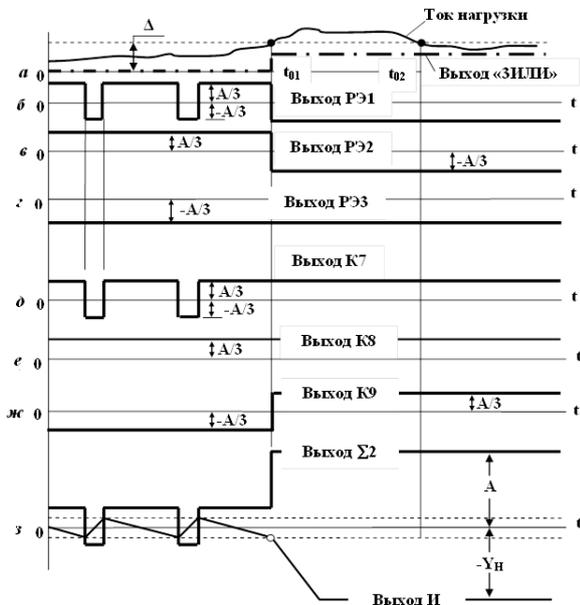


Рис. 3. Временные диаграммы РН при перегрузках по току

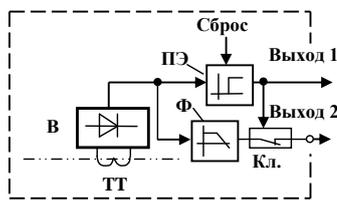


Рис. 4. Функциональная схема датчиков тока ДТ1 – ДТ3

Для защиты РН от перегрузки по току выходы ДТ1-ДТ3 дополнительно подключены к логическому элементу «ЗИЛИ». Логический элемент «ЗИЛИ» переключается в состояние логической «1», если хотя бы одна из трех входных логических переменных равна «1». Выход элемента «ЗИЛИ» соединен с R-входами всех динамических D-триггеров, со стробирующими входами РЭ1–РЭ3 и со стробирующими входами компараторов К7-К9. В результате при возникновении перегрузки по току происходит перевод РЭ1–РЭ3 и D-триггеров в состояние, при котором силовые ключи размыкаются, а К7-К9 переключаются в идентичное

состояние, приводящее к «насыщению» интегратора, что дублирует функции стробирующих входов релейных элементов (см. рис. 3).

В состав датчиков тока ДТ1, ДТ2 и ДТ3 входят (см. рис. 4) трансформатор тока ТТ, демодулятор (выпрямитель) В, пороговый элемент ПЭ, сглаживающий фильтр Ф и нормально замкнутый ключ Кл. Демодулятор В является однофазным двухполупериодным. Пороговый элемент ПЭ переключается в состояние «1» при условии превышения входным сигналом пороговой величины «Δ». Фильтр Ф, например, апериодический первого порядка является сглаживающим, предназначенным для подавления выходных пульсаций демодулятора В. Ключ Кл. размыкается при переходе порогового элемента ПЭ в состояние «1».

В РН осуществляется ЧШИ регулирования выходного сигнала клемма «а» (Фаза А, силовой ключ Кл.1) регулятора напряжения (см. рис. 2, ж) и обеспечение режима включено/выключено силовых ключей Кл.2 и Кл.3 (см. рис. 3, з, и) в функции входного сигнала. Кроме того, регулятор напряжения останется работоспособным при отказе, например РЭ1, когда он переходит в неуправляемое состояние +A/3, или при отказах некоторых других элементов, например К1, К4, К7 или D-триггер 1, по аналогии со схемой регулятора подробно рассмотренной в работе [13].

Рассмотрим работу РН для случая превышения током нагрузки допустимой величины, определяемой порогом включения «С» порогового элемента ПЭ (рис. 3, а, момент  $t_{01}$ ).

Предположим, что в момент времени  $t_{01}$  (см. рис. 3, а) хотя бы один из датчиков тока ДТ1, ДТ2, ДТ3 на своем дискретном выходе сформировал сигнал логической единицы, который через логический элемент «ЗИЛИ» передается на стробирующие входы РЭ1-РЭ3, компараторов К7-К9 и R-входы D-триггеров 1, 2 и 3. В результате РЭ1-РЭ3 принудительно переключаются и удерживаются в состоянии  $-A/3$  (рис. 3, б-г).

Одновременно D-триггеры 1, 2, 3 переводятся в состояние «0» за счет сигнала «1» на их R-входе, а компараторы К7-К9 оказываются в положении  $-A/3$  (рис. 3, д-ж). Выходной сигнал интегратора И (рис. 3, з) под действием выходного сигнала +A с выхода второго сумматора Σ2 достигает зоны «насыщения»  $-Y_n$  операционного усилителя интегратора.

Таким образом, реализуется многоуровневая система защиты силовых ключей Кл.1-Кл.3 по току в цепи нагрузки  $R_n$ , которая работает следующим образом.

Первый уровень: РЭ1-РЭ3 и компараторы К1-К3 принудительно устанавливаются в «0», что препятствует переключению D-триггеров 1, 2 и 3 в «1» и замыканию какого-либо из силовых ключей Кл.1, Кл.2, Кл.3.

Второй уровень: воздействие выходного сигнала логического элемента «ЗИЛИ» на R-входы D-триггеров 1, 2 и 3 приводит к их установке и удержанию в положении «0», что дублирует функции первого уровня.

Третий уровень: перевод компараторов К7-К9 в положение  $-A/3$  обеспечивает формирование на выходе второго сумматора Σ2 импульса максимальной амплитуды +A, под действием которого происходит режим насыщения  $-Y_n$  интегратора, когда РЭ1-РЭ3 в слу-

чае отказа стробирующих входов принудительно удерживаются в состоянии «0» по информационному входу. Это дублирует функции первого и второго уровней.

Кроме того, при переходе порогового элемента ПЭ (см. рис. 4) в состояние «1» происходит отключение аналогового выхода соответствующего из датчиков тока ДТ1-ДТ3 от первого сумматора  $\Sigma 1$ , что увеличивает вероятность «насыщения» интегратора И выходным сигналом второго сумматора  $\Sigma 2$ , например, при отказе одного из компараторов К7-К9, когда он находится в неуправляемом положении  $-A/3$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Повышенная надежность в регуляторе напряжения достигается за счет того, что при перегрузке по току происходит блокировка всей цепочки элементов осуществляющих управление силовыми ключами многозонного интегрирующего регулятора переменного напряжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельман М.В., Лохов С.П. Тиристорные регуляторы переменного напряжения. М.: Энергия, 1975. 104 с.
2. Брылина О.Г. Статические и динамические спектральные характеристики многозонного преобразователя с частотно-широотно-импульсной модуляцией // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Вып. 13. № 1. С. 70–79.
3. Дудкин М.М., Цытович Л.И., Брылина О.Г. Спектральные характеристики разветвляющих преобразователей с широтно-импульсной и частотно-широотно-импульсной модуляцией // Электротехника. 2013. №10. С.18–25.
4. Брылина О.Г. Регуляторы переменного напряжения с частотно-широотно-импульсной модуляцией // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Вып.17. 2012. №16. С. 26-30.
5. Пат. 2470360 РФ, G06G7/12, G05B11/00. Многозонный интегрирующий регулятор переменного напряжения с автоматическим резервированием каналов регулирования / Цытович Л.И., Брылина О.Г. №2011139292/08. Заявл. 26.09.2011. Оpubл. 20.12.2012. Бюл. №35. 17с.

6. Система регулирования температуры и непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической обработки / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.Ю. Мылников, В.А. Тюгаев, А.В. Тюгаев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Раздел «Приборы и средства автоматизации». 2012. № 8. С. 45–50.

7. Пат 2471282 РФ. H02M5/22, G05D23/19. Многозонный интегрирующий регулятор переменного напряжения / Цытович Л.И., Брылина О.Г., Тюгаев А. В. №2011146573/07(069763). Заявл. 16.11.2011. Оpubл. 27.12.2012. Бюл. №36. 18с.

8. Терещина (Брылина) О.Г. Электроприводы с параллельными каналами регулирования на основе многозонных интегрирующих разветвляющих преобразователей: дис. ... канд. техн. наук / О.Г. Терещина (Брылина). Челябинск: ЮУрГУ, 2007. 235 с.

9. Аналого-цифровой преобразователь с интегрирующей синфазной амплитудно-частотно-импульсной модуляцией для систем вентильного электропривода / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин, А.В. Тюгаев // Электротехника. 2013. № 5. С. 10–15.

10. Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентильными преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // Электротехника. №3. 2013. С.8-15.

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

12. Замкнутый интегрирующий аналого-цифровой преобразователь с бестактовым поразрядным уравниванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин, О.Г. Брылина // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Раздел «Приборы и средства автоматизации». 2012. №11. С. 27–35.

13. Брылина О.Г., Цытович Л.И. Частотно-широотно-импульсный регулятор переменного напряжения с автоматическим резервированием каналов управления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Вып. 16. 2011. №34. С.56-60.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### MULTI-ZONE INTEGRATING AC REGULATOR OPERATING WITH CURRENT OVERLOAD

Brylina O.G.

The design principle of a variable voltage frequency-width-pulse regulator reliably working in overcurrent mode is considered in this article. The voltage regulator was developed on the basis of the multi-zone integrating sweep converter. The block schemes of the regulator and the current sensor forming its structure are given. Time diagrams explaining the operation of the regulator including the overcurrent mode are also given.

**Keywords:** variable voltage regulator, multi-zone modulation, frequency-width-pulse modulation, relay element, integrator, dynamic D-trigger, overcurrent.

#### REFERENCES

1. Gelman M.V., Lohov S.P. *Thyristor regulators of variable voltage*. Moscow: Energy, 1975. 104 p.
2. Brylina O.G. Static and dynamic spectral characteristics of multi-zone transducer with frequency-pulse-width modulation]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2013, issue 13, no. 1, pp. 70–79.

3. Dudkin M.M., Tsytoich L.I., Brylina O.G. *Spektralnye karakteristiki razvertyvayuschikh preobrazovatelei s shirotno-impulsnoi i chastotno-shirotno-impulsnoi modulyatsiei* [Spectral characteristics of scanning transducers with pulse-width and frequency-pulse-width modulation]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2013, no.10, pp.18-25.

4. Brylina O.G. *Regulyatory peremennogo napryazheniya s chastotno-shirotno-impulsnoi modulyatsiei* [Variable voltage regulators with frequency-pulse-width modulation] [Text] // *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2012, Issue 17, no. 16, pp. 26-30.

5. RF Patent 2470360. G06G7/12, G05B11/00. Multi-zone integrating regulator of variable voltage with automatic redundancy of actuating paths. Tsytoich L.I., Brylina O.G. №2011139292/08; applied 26.09.2011; published 20.12.2012. Bulletin no. 35. 17p.

6. Tsytoich L.I., Rakhmatulin R.M., Brylina O.G., Dudkin M.M., Mylnikov A.Yu., Tugaev V.A., Tugaev A.V. *Sistema*

regulirovaniya temperatury i nepreryvnogo kontrolya soprotivleniya izolyatsii elektrotehnicheskikh izdelii v protsesse ih termicheskoj obrabotki [Systems of temperature control and insulation resistance monitoring of electrical units in the process of their heat treatment]. *Pribori i sistemi. Upravlenie, control, diagnostika. Razdel «Pribori i sredstva avtomatizatsii»* [Instruments and systems. Control and diagnostics. Section «Instruments and automation equipment»], 2012, no. 8, pp. 45–50.

7. RF Patent 2471282. H02M5/22, G05D23/19. Multi-zone integrating regulator of variable voltage [Text] / Tsytoich L.I., Brylina O.G., Tugaev A.V. №2011146573/07(069763); applied 16.11.2011; published 27.12.2012. Bulletin no. 36. 18p.

8. Tereschina (Brylina) O.G. *Elektroprivody s parallelnymi kanalami regulirovaniya na osnove mnogozonnykh integriruyuschih razvertyvayuschih preobrazovatelei* [Electric drives with parallel actuating paths on the basis of multi-zone integrating scanning transducers]. Ph. D. Thesis (Engineering). Chelyabinsk: SUSU, 2007, 235 p.

9. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rahmatulin R.M., Tugaev A.V. Analogo-tsifrovoy preobrazovatel s integriruyuschei sinfazoi amplitudno-chastotno-impulsnoy modulyatsiyey dlya sistem ventilyonogo elektroprivoda [Analog-to-digital converter with integrating in-phase with amplitude-frequency-pulse modulation for valve electric drive systems] [Text]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2013, no. 5, pp. 10–15.

10. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rahmatulin

R.M. Adaptivnaya intervalo-kodovaya dvoichno-desyatichnaya integriruyuschaya sinhronizatsiya sistem upravleniya silovymi ventilyonimi preobrazovatelyami [Adaptive interval-code binary-to-decimal integrating control systems synchronizing for power valve inverters]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2013, no. 3, pp.8-15.

11. Dudkin M.M., Tsytoich L.I., Brylina O.G. Dinamicheskie spektralnye karakteristiki razvertyvayuschih preobrazovatelei s shirotno-impulsnoy modulyatsiyey [Dynamic spectral characteristics of scanning transducers with width-pulse modulation]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics], 2012, no. 4(48), pp. 49–55.

12. Lohov S.P., Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Rahmatulin R.M., Brylina O.G. Zamknutyi integriruyuschii analogo-tsifrovoy preobrazovatel s bestaktovym porazryadnym uravnoveshivaniem [Closed integrating analog-to-digital converter with stepless bit-wise balancing]. *Pribori i sistemi. Upravlenie, control, diagnostika. Razdel «Pribori i sredstva avtomatizatsii»* [Instruments and systems. Control and diagnostics. Section «Instruments and automation equipment»], 2012, no.11, pp. 27–35.

13. Brylina O.G., Tsytoich L.I. Chastotno-shirotno-impulsnyi regulyator peremennogo napryazheniya s avtomaticheskim rezervirovaniem kanalov upravleniya [Frequency-width-pulse regulator of variable voltage with automatic reservation of actuating paths]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2011, issue 16, no.34, pp. 56-60.

УДК 621.314 + 681.51

Дудкин М.М.

## АДАПТИВНАЯ ИНТЕГРИРУЮЩАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Рассматриваются принцип построения, структура и основные технические характеристики тиристорного регулятора напряжения (ТРН) с адаптивной интегрирующей системой управления для плавного пуска асинхронных электродвигателей и силовыми ключами «тиристор-диод». ТРН предназначен для работы в условиях высокого уровня внешних помех, включая коммутационные искажения сети, а также при нестабильности амплитуды и частоты промышленной сети, что позволяет использовать его на объектах с «проблемной» сетью.

**Ключевые слова:** тиристорный регулятор напряжения, плавный пуск, система управления, интегрирующий развертывающий преобразователь, помехоустойчивость.

### ВВЕДЕНИЕ

Значительное повышение за последние годы цен на энергоносители и электротехническое оборудование делает актуальными проблемы поиска высокоэффективных путей экономии электроэнергии и применения алгоритмов управления промышленными объектами, обеспечивающих повышенный срок службы технологического оборудования с целью снижения затрат на их обслуживание и ремонт. Одним из таких путей является применение тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) для мягкого пуска асинхронных электродвигателей (АД), составляющих на большинстве промышленных предприятий до 90% от общей численности электроприводов. При этом ТРН позволяют:

- снизить затраты на электрооборудование питающей сети и кабельных линий за счет существенного уменьшения пусковых токов АД;
- увеличить срок службы электродвигателей, технологического оборудования по причине тепловых и механических перегрузок, характерных для режима пря-

мого пуска;

- перевести не менее 30% технологических механизмов в режим повторно-кратковременных включений при экономии электроэнергии в пределах 30-70% и снижении мощности исполнительных электродвигателей.

Однако в ряде случаев надежной работе серийно выпускаемых ТРН препятствует высокий уровень внешних помех [1, 2], что делает их применение малоэффективным из-за низкой помехоустойчивости системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и частых сбоях ее в работе, особенно на объектах с мало-мощной сетью.

На кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Южно-Уральского государственного университета на основе проведенных исследований методов интегрирующего развертывающего преобразования разработан ТРН [2], предназначенный для работы в условиях высокого уровня внешних помех и нестабильности параметров промышленной сети.