

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.

ТРН лег в основу реконструкции асинхронных электроприводов технологических установок в ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» (ЧТПЗ).

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И СТРУКТУРА ТРН С АДАПТИВНОЙ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Отличительной особенностью ТРН с адаптивной интегрирующей системой управления является то, что в СИФУ все каналы фаз *A*, *B*, *C* выполнены по однотипной структуре на базе замкнутых интегрирующих РП-А, РП-В, РП-С (рис. 1), работающих в режиме внешней синхронизации с частотой напряжения сети [3–5] и выполняющих в системе управления одновременно функции как узлов синхронизации, так и фазосдвигающих устройств (ФСУ), что в значительной степени упрощает техническую реализацию ТРН и делает надежной его работу в условиях высокого уровня помех, включая коммутационные искажения сети, а также в условиях нестабильности амплитуды и частоты сети. Все это позволяет использовать данные регуляторы на объектах с «проблемной» сетью, когда электропитание объекта осуществляется, например, от дизель- или ветро-генераторных установок.

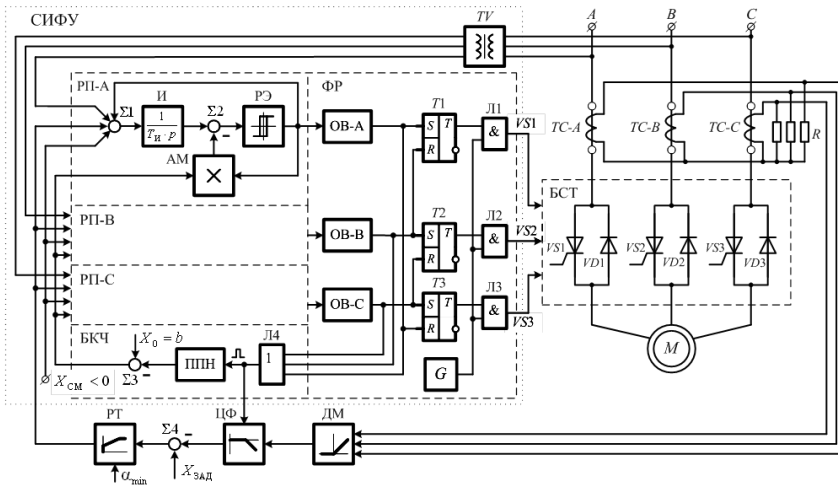


Рис. 1. Функциональная схема ТРН с адаптивной интегрирующей СИФУ для плавного пуска асинхронных электродвигателей

Силовая часть преобразователя выполнена по схеме «тиристор-диод» (см. рис. 1), что позволяет существенно упростить систему управления ТРН и улучшить условия ее коммутации в различных режимах работы. Кроме этого, данный вариант включения силовых вентилях является наиболее рациональным для систем плавного пуска асинхронных электродвигателей, когда не требуется реверс [6].

Ограничение пускового тока статора АД на уровне 2–3 номинального значения в ТРН осуществляется при помощи контура тока, выполненного на основе трансформаторов тока *ТС-А*, *ТС-В*, *ТС-С*, демодулятора ДМ, цифрового фильтра ЦФ, сумматора Σ и интегрального регулятора тока РТ (см. рис. 1).

Принцип работы адаптивной интегрирующей СИФУ рассмотрим на примере фазы *A*, т.к. процессы в остальных каналах управления протекают аналогичным образом.

Каждый из РП-А, РП-В, РП-С состоит из сумматоров $\Sigma 1$ – $\Sigma 2$, интегратора И с постоянной времени интегрирования $T_{и}$, релейного элемента РЭ с порогами

переключения $\pm b$ и симметричной относительно «нуля» неинвертирующей петлей гистерезиса, а также амплитудного модулятора АМ (см. рис. 1).

При отсутствии сигнала управления (выход РТ) и напряжения смещения $X_{см}$ на выходе РП-А устанавливаются знакопеременные импульсы, сдвинутые относительно синхронизирующего напряжения фазы *A* на угол α_c (рис. 2, а, б).

В работе [7] показано, что при внешней синхронизации ФСУ гармоническим сигналом со стороны информационного входа оптимальным уровнем нормированного значения периода собственных автоколебаний РП $\bar{T}_0 = T_0 / T_c$ следует считать значение 0,1, когда в системе обеспечивается максимально возможный диапазон регулирования угла управления α_y тиристорами. Здесь T_c – период напряжения сети (см. рис. 2, а); $T_0 = 4\bar{b}T_{и}$ – период собственных автоколебаний РП при отсутствии всех сигналов на его входе; $\bar{b} = |b/A|$ – нормированная величина порогов переключения РЭ по отношению к его амплитуде *A* на выходе.

Регулировочная характеристика $\alpha_y = f(\bar{X}_{вх})$ ин-

тегрирующего РП при $\bar{T}_0 = 0,1$ приведена на рис. 3, из которой можно сделать вывод, что в РП-А, РП-В и РП-С, входящих в состав адаптивной СИФУ ТРН (см. рис. 1), глубину синхронизации $\bar{A}_c = |A_c/A|$ следует выбирать в диапазоне $6,0 \leq \bar{A}_c \leq 8,0$, когда регулировочные характеристики становятся практически линейными, а угол управления α_y при $\bar{X}_{вх} = 0$ близким по значению к минус 90 эл. град. Здесь $\bar{X}_{вх} = |X_{вх}/A|$ – нормированное значение входного сигнала $X_{вх}$; A_c – амплитуда сигнала синхронизации (напряжения сети).

При помощи напряжения смещения $X_{см}$ отрицательной полярности, воздействующего на вход РП-А (см. рис. 1), задается начальный угол управления α_0 тиристором фазы *A* (см. рис. 2, б), который выбирается около 160 эл. град.

Для пуска электродвигателя с ограничением тока на заранее заданном уровне, устанавливаемом источником $X_{зад}$, в системе управления используется интегральный регулятор тока РТ (см. рис. 1), который в процессе разгона АД автоматически изменяет угол управления α_y на выходе РП-А (см. рис. 2, в), поддерживая тем самым величину заданного пускового тока двигателя. Разгон АД завершается, когда РТ переходит в режим насыщения, а в РП-А устанавливается минимальный угол управления α_{min} (см. рис. 2, в), численное значение которого выбирается около 5–10 эл. град. В результате этого во всех режимах работы электродвигателя все развертывающие преобразователи РП-А, РП-В, РП-С работают в импульсном режиме, что необходимо для работы формирователя-распределителя ФР импульсов управления и блока коррекции частоты БКЧ, входящего в состав адаптивной интегрирующей СИФУ (см. рис. 1).

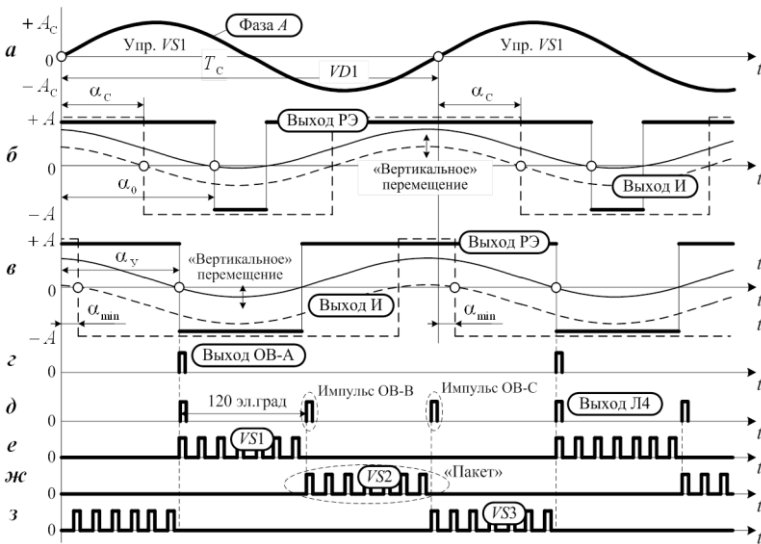


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов адаптивной интегрирующей СИФУ тиристорного регулятора напряжения

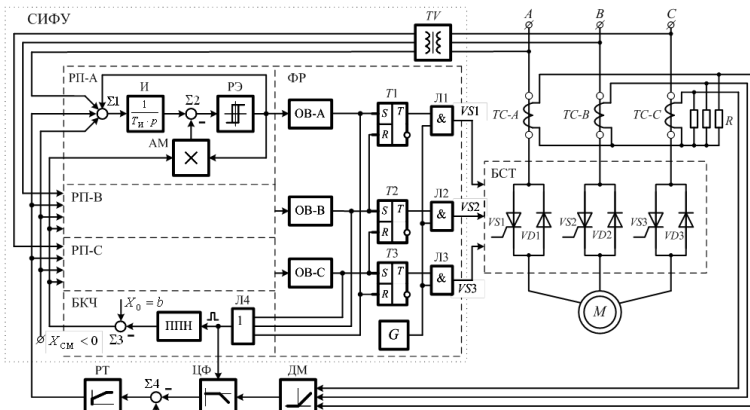


Рис. 3. Регулировочная характеристика интегрирующего РП в режиме внешней синхронизации гармоническим сигналом со стороны информационного входа

Формирователь-распределитель ФР импульсов управления тиристорами $VS1-VS3$ состоит из одновибраторов $OB-A, OB-B, OB-C$, SR -триггеров $T1-T3$, логических элементов $Л1-Л3$ и генератора высокочастотных импульсов G (см. рис. 1). При этом $OB-A, OB-B, OB-C$ формируют короткие импульсы малой длительности по заднему фронту сигналов с выхода РП-А, РП-В, РП-С (рис. 2, г, д). Интервал времени между импульсами соответствует 120 эл. град, т.к. фазы A, B, C сдвинуты друг относительно друга на этот же угол. SR -триггеры $T1-T3$ совместно с логическими элементами $Л1-Л3$ и генератором G (см. рис. 1) формируют импульсы в виде «пакета» для включения тиристоров $VS1-VS3$ (рис. 2, е-з). Длительность импульсов в «пакете» составляет 120 эл. град, что с большим запасом перекрывает интервал времени проводящих состояний тиристоров $VS1-VS3$ на участке разгона двигателя, т.к. во время запуска угол управления α_y находится в районе 90-130 эл. град, зависящем от сигнала задания $X_{зад}$.

В случае нестабильности частоты напряжения сети в СИФУ введен блок коррекции частоты БКЧ (см. рис. 1), обеспечивающий адаптацию угла управления α_y в РП-А, РП-В, РП-С при изменении частоты питающего напряжения.

БКЧ состоит из преобразователя периода в напряжение ППН, сумматора $\Sigma3$ с источником опорного напряжения $X_0=b$ и логического элемента $Л4$ типа «ЗИЛИ», формирующего импульсы, следующие друг за другом через $T_c/3$ или 120 эл. град (см. рис. 2, д). ППН измеряет период T_c напряжения сети, например, путем подсчета импульсов стабильной частоты за время $T_c/3$ с последующим преобразованием полученного результата в аналоговый сигнал. Амплитудные модуляторы АМ, входящие в состав каждого из РП-А, РП-В, РП-С (см. рис. 1), регулируют период автоколебаний $T_0 = 4bT_{и}$ в развертывающих преобразователях за счет коррекции порогов переключения $\pm b$ РЭ таким образом, чтобы при изменении частоты напряжения сети всегда поддерживалось равенство $\bar{T}_0 = T_0/T_c = 0,1$.

В результате этого регулировочная характеристика РП (см. рис. 3) сохраняется неизменной в условиях нестабильности частоты питающего напряжения.

Отличительной особенностью адаптивной интегрирующей СИФУ является также то, что цифровой фильтр ЦФ, включенный в цепи обратной связи по току (см. рис. 1), работает синхронно на частоте дискретизации ТРН и выполнен на основе реверсивного число-импульсного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с амплитудно-частотно-импульсной модуляцией (АЧИМ), впервые предложенного в работах [8-10]. Применение интегрирующего АЦП с АЧИМ в качестве ЦФ позволяет не только повысить помехоустойчивость в канале обратной связи по току к сигналам внешних помех, но и обеспечивает автоматическую автоподстройку его постоянной времени при изменении частоты питающего напряжения за счет синхронимпульсов, формируемых логическим элементом $Л4$ в БКЧ (см. рис. 1) и следующих друг за другом через 120 эл. град., а также подавление пульсирующей составляющей в датчике тока, равной 150 Гц для трехфазной нулевой схемы демодуляции ДМ.

Теоретические и экспериментальные исследования [2, 11, 12] показали, что наряду с высокой помехоустойчивостью со стороны информативного канала управления ТРН с адаптивной интегрирующей СИФУ сохраняет свою работоспособность при коммутационных «провалах» напряжения сети, достигающих уровня 100% на 20-25 эл. град. Это в значительной степени превосходит аналогичные параметры традиционных СИФУ «вертикального» типа отечественного и зарубежного производства [6, 13-15]. Кроме того, ТРН сохраняет свою работоспособность не только в условиях нестабильности амплитуды, но и частоты напряжения сети в пределах $\pm 50\%$, что достигается за счет интегрирующих развертывающих преобразователей, работающих совместно с блоком коррекции частоты. Это позволяет использовать данные ТРН для плавного пуска АД в автономных сетях ограниченной мощности с

существенной ошибкой частоты генерируемого напряжения.

Схемные решения технической реализации ТРН с интегрирующими СИФУ для плавного пуска АД подробно рассмотрены в работах [2]. В состав ТРН входит также весь комплекс быстродействующих селективных защит: максимальная токовая, времятоковая и от исчезновения фазного напряжения. Здесь следует отметить, что защита от пропадания фазного напряжения, впервые предложенная в работе [16], выполнена по интегрируемому принципу с временем срабатывания порядка 3–5 с, что позволяет системе не реагировать на кратковременное исчезновение фазного напряжения в пределах нескольких периодов напряжения сети. При этом «заторможенность» данного контура защиты исключает ложную остановку электродвигателя и технологического процесса в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ

В период 2005-2013 гг. в ОАО ЧТПЗ на основе рассмотренных выше ТРН было реконструировано 84 асинхронных электропривода 15 технологических установок на суммарную мощность исполнительных электродвигателей более 7600 кВт.

Результаты применения ТРН в ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» показали высокую эффективность систем плавного пуска асинхронных электродвигателей. Так, перевод только электроприводов насосов наполнения гидропрессов (160 кВт) в режим повторно-кратковременных включений, что ранее оказывалось невозможным по причине применения систем релейно-контакторного пуска, позволяет сократить затраты предприятия на электроэнергию более чем на 2 млн руб. в год (в ценах 2012 г.).

Второй, причем не менее важной, чем энергосбережение, статьей экономической эффективности является высокий уровень ресурсосбережения, который обеспечивается системами плавного пуска асинхронных электродвигателей. Так, до реконструкции указанных объектов среднестатистический годовой отказ электрооборудования (электродвигателей, силовых контакторов) и технологических механизмов (масляных и водяных насосов) достигал 25-40% от их общего числа [17]. С момента перевода электроприводов в режим плавного пуска при наличии в ТРН всего комплекса быстродействующих селективных защит от аварийных режимов работы не было зафиксировано ни одного случая отказа электро- и технологического оборудования, что позволяет сократить расходы предприятия на ремонт и обслуживание электроустановок, в частности, по цеху №6 в среднем на 2,2 млн руб. в год. При этом срок окупаемости затрат на реконструкцию электроприводов в зависимости от специфических особенностей объекта находится в пределах 1,4-2,1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Разработан и экспериментально исследован ТРН с адаптивной интегрирующей СИФУ для плавного пуска АД и силовыми ключами «тиристор-диод», предназначенный для работы в условиях высокого уровня внешних помех и нестационарности параметров промышленной сети.

2. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что наряду с высокой помехоустойчивостью со стороны информативного канала управления ТРН с адаптивной интегрирующей СИФУ сохраняет свою работоспособность при коммутационных «провалах» напряжения сети, достигающих уровня 100% на 20–25 эл. град, а также в условиях нестабильности амплитуды и частоты напряжения сети в пределах $\pm 50\%$, что достигается за счет интегрирующих развертывающих преобразователей, работающих совместно с блоком коррекции частоты. Эти показатели превосходят не менее чем в 2-3 раза аналогичные параметры традиционных СИФУ «вертикального» типа отечественного и зарубежного производства.

В период 2005-2013 гг. в ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» на основе разработанных ТРН было реконструировано 84 асинхронных электропривода 15 технологических установок на суммарную мощность исполнительных электродвигателей более 7600 кВт. Экономический эффект от внедрения оборудования составил более 6,9 млн руб. в год и получен за счет экономии электроэнергии при переводе асинхронных электроприводов в повторно-кратковременный режим работы и сокращения расходов на ремонт и обслуживание силового электрооборудования технологических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осипов О.И. Техническое диагностирование автоматизированного электропривода постоянного тока: дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск: ЧПИ, 1995. 405 с.
- Дудкин М.М., Цытович Л.И. Элементы информационной электроники систем управления вентилями преобразователями: монография. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. 362 с.
- Интегрирующее устройство синхронизации с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, А.В. Тюгаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Т.13. № 2. С. 53–61.
- Качалов А.В., Цытович Л.И., Дудкин М.М. Интегрирующие устройства синхронизации для систем импульсно-фазового управления вентилями преобразователями // Практическая силовая электроника. 2010. №1(37). С. 42–51.
- Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентилями преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // Электротехника. 2013. №3. С. 8–15.
- Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.
- Дудкин М.М. Интегрирующие фазосдвигающие устройства для управления силовыми вентилями преобразователями: дис. ... канд. техн. наук / М.М. Дудкин. Челябинск: ЮУрГУ, 2007. 235 с.
- Пат. 2429563 РФ, МПК⁷ Н 03 М 1/02. Реверсивный число-импульсный аналого-цифровой преобразователь / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин. № 2009147981/09. Заявл. 23.12.09. Опубл. 20.09.11. Бюл. № 26.
- 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.
- About the dynamics of some methods of integrating conversion of analog signal into digital code / L.I. Tsytovich,

M.M. Dudkin, S.P. Lokhov, O.G. Brylina // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Т. 13. №1. С. 80–91.

11. Цытович Л.И., Шкаликов С.И., Дудкин М.М. Тиристорный преобразователь с интегрирующим устройством для мягкого пуска асинхронных // Проблемы энергетики: известия высших учебных заведений. Казань: Изд-во КГЭУ, 2005. № 7-8. С. 57-65.

12. Тиристорная станция управления интегрирующего типа для плавного пуска асинхронных электродвигателей / Л.И. Цытович, Р.Х. Гафиятуллин, Р.М. Рахматулин и др. // Наука и технологии. Избранные труды Российской школы «К 70-летию Г.П. Вяткина». М.: РАН, 2005. С. 520-526.

13. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Шишков А.Н. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // Электротехника. 2013. №3. С. 37-43.

14. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокат-

ки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2012. Вып. 17. №16(275). С. 107-110.

15. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Усынина Ю.С., Григорьева М.А., Шишкова А.Н. и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2012. Вып. 18. №37(296). С. 38–41.

16. Пат. 2275723 Российская Федерация, МПК7 Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 7/00. Устройство защиты тиристорного преобразователя / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина. №2005100929/09. Заявл. 17.01.05. Опубл. 27.04.06. Бюл. №12.

17. Пути развития энергохозяйства и энергосбережений на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» / С.И. Шкаликов, Ю.Г. Попов, В.А. Тюгаев и др. // Наука и технологии: Труды XXVIII Российской школы. М.: РАН, 2008. Т.2. С.153-162.

INFORMATION IN ENGLISH

ADAPTIVE INTEGRATION CONTROL SYSTEM OF THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR

Dudkin M.M.

The principle of constructing, structure and basic characteristics of the thyristor voltage regulator (TVR) with an adaptive integration control system for smooth start of asynchronous motors and power semiconductor «thyristor-diode» are considered. TVR is intended for operation in conditions of a high level of external noises including commutative distortions of mains as well as at amplitude and frequency instability of an industrial network that allows to use it for facilities with a «problem» mains.

Keywords: thyristor voltage regulator, smooth start, control system, integrating scanning converter, noise stability.

REFERENCES

1. Osipov O.I. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie avtomatizirovannogo elektroprivoda postoyannogo toka* [Technical diagnosis of automatic DC electric drive]: D.Sc. (Eng.) thesis. Chelyabinsk: ChPI, 1995. 405 p.

2. Dudkin M.M., Tsytoich L.I. *Elementy infomatsionnoy elektroniki sistem upravleniya ventilnymi preobrazovatelyami* [Information electronics elements of valve inventor control systems]: monograph. Chelyabinsk: Publishing centre of SUSU, 2011. 362 p.

3. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Tugaev A.V. *Integriruyushee ustroystvo sinhronizatsii s psevdosledyaschei fiksatsiyei toчек estestvennoi kommutatsii napryazheniya seti* [Integrating synchronizing device with pseudo scanning fixation of natural commutation points of circuit voltage]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2013, vol. 13, no. 2, pp. 53-61.

4. Kachalov A.V., Tsytoich L.I., Dudkin M.M. *Integriruyuschie ustroystva sinhronizatsii dlya sistem impulsno-fazovogo upravleniya ventilnymi preobrazovatelyami* [Integrating synchronization devices for pulse-phase control systems of valve inverters]. *Practicheskaya Silovaya Elektronika* [Practical power electronics], 2010, no. 1(37), pp. 42–51.

5. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rahmatulin R.M. *Adaptivnaya intervalo-kodovaya dvoichno-desyatchnaya integriruyuschaya sinhronizatsiya sistem upravleniya silovymi ventilnymi preobrazovatelyami* [Adaptive interval-code binary-to-decimal integrating control systems synchronizing for power valve inverters]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2013, no.3, pp. 8–15.

6. Petrov L.P., Andryuschenko O.A., Kapinos V.I., et al.

Tiristornye preobrazovateli napryazheniya dlya asinhronnogo elektroprivoda [Thyristor voltage converters for induction electric drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 200 p.

7. Dudkin M.M. *Integriruyuschie fazozdvigayuschie ustroystva dlya upravleniya silovymi ventilnymi preobrazovatelyami* [Integrating phase-shifting devices for power valve inverters]: Ph.D. (Engineering) thesis. Chelyabinsk: SUSU, 2007. 235 p.

8. RF Patent 2429563, МПК7 Н 03 М 1/02. *Reversivnyi chislo-impulsnyi analogo-tsifrovoy preobrazovatel* [Reverse numerical-impulse analog-to-digital converter]. L.I. Tsytoich, M.M. Dudkin, A.V. Kachalov, R.M. Rahmatulin. No.2009147981/09; applied 23.12.09; published 20.09.11, Bulletin no. 26.

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

10. 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* [Text]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 80–91.

11. Tsytoich L.I., Shkalikov S.I., Dudkin M.M. *Tiristornyye preobrazovateli s integriruyuschim ustroystvom dlya myagkogo puskа asinhronnykh elektrodvigatelyi* [Thyristor converter with integrating device for soft starting of induction electric drives]. *Problemy energetiki: izvestiya visshih uchebnykh zavedenii* [Power engineering issues: proceedings of universities]. Kazan: Publishing house of KGEU, 2005. No.7-8. Pp. 57–65.

12. Tsytoich L.I., Gafiyatullin R.H., Rahmatulin R.M., et al. *Tiristornaya stantsiya upravleniya integriruyuschego tipа dlya pлавного puskа asinhronnykh elektrodvigatelyi* [Integrating thyristor control station for soft starting of induction motors]. *Nauka i tehnologii. Izbrannye trudi Rossiiskoi shkoly «K 70-letiyu G.P. Vyatkin»* [Science and technology. Selected works of the Russian school «Dedicated to the 70th anniversary of G.P. Vyatkin»]. M.: Russian Academy of Sciences, 2005. pp. 520–526.

13. Usynin Yu.S., Grigoryev M.A., Shishkov A.N. *Ventilnyi elektroprivod s sinhronnoy reaktivnoy mashinoy*

nezavisimogo возбuzhdeniya [Valve electric drive with separately excited reluctance motor]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2013, no. 3, pp. 37–43.

14. Usynin Yu.S., Lohov S.P., Grigoryev M.A., et.al. Elektroprivody s sinhronnoi reaktivnoi mashinoy nezavisimogo возбuzhdeniya dlya stanov holodnoi prokatki trub [Electric drives with synchronous separately excited reluctance motor for cold rolling tube mills]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2012, issue 17, no. 16(275), pp. 107–110.

15. Usynina Yu.S., Grigoryeva M.A., Shishkova A.N., et.al. Sintez sistemy upravleniya elektroprivodom s sinhronnoi reaktivnoi mashinoy nezavisimogo возбuzhdeniya [Integration of electric drive control system and synchronous separately excited

reluctance motor]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2012, issue 18, no. 37(296), pp. 38–41.

16. RF Patent 2275723, МПК7 H 02 H 3/24, H 02 H 7/00. *Ustroistvo zaschity tiristornogo preobrazovatelya* [Thyristor converter protecting device]. L.I. Tsytoich, M.M. Dudkin, O.G. Tereschina. № 2005100929/09; applied 17.01.05; published 27.04.06, Bulletin no. 12.

17. Shkalikov S.I., Popov Yu.G., Tugaev V.A., et.al. Puti razvitiya energochoyzaivstva i energosberezhenii na OAO «Chelyabinskii truboprokatnyi zavod» [Ways of power utilities and energy saving development at OJSC «Chelyabinsk tube-rolling mill»]. // *Nauka i tehnologii: trodi XXVII Rossiiskoi shkoli* [Science and technology. works of the XXVII Russian school]. M.: Russian Academy of Sciences, 2008. Vol. 2. Pp. 153–162.

УДК 621.313

Линьков С.А., Сарваров А.С., Бачурин И.В.

АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Проведен анализ систем управления современных синхронных электроприводов по каналу цепи статора и ротора. Рассмотрены преимущества и недостатки систем регулирования, обеспечивающих гашение угла нагрузки синхронной машины в динамических режимах работы.

Ключевые слова: система управления синхронным двигателем, угол нагрузки, положительная обратная связь, синхронный двигатель, статор, ротор.

ВВЕДЕНИЕ

За несколько десятилетий автоматизированный электропривод синхронных машин продвинулся далеко вперед. Системы управления синхронных машин и их конструкция претерпели значительные изменения и усложнения. Основными направлениями развития синхронных автоматизированных электроприводов являются совершенствование систем автоматического регулирования по каналу возбуждения и статора СД с целью обеспечения их устойчивой работы в статических и динамических режимах, частотное управление скоростью двигателей для различного типа механизмов.

Существующие на данный момент системы управления (СУ) синхронных двигателей (СД) делятся на:

- 1) СУ по каналу цепи обмотки возбуждения;
- 2) СУ по каналу цепи якоря (статора);
- 3) гибридные СУ СД (по каналу статора и ротора).

Система АРВ с улучшенными динамическими характеристиками должна:

- обеспечивать устойчивую работу СД в переходных режимах при минимуме колебаний активной и реактивной мощности;
- демпфировать качания ротора и активного тока статора.

САРВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СТАТИЧЕСКОМУ МОМЕНТУ НАГРУЗКИ

Данный способ автоматического регулирования прост с точки зрения реализации и не требует математической обработки и вычислений (рис. 1).

Сигнал статического момента напрямую с датчика поступает на внутренний контур регулирования тока возбуждения посредством положительной обратной

связи. В качестве датчика статического момента в таких системах используют тензометрические датчики, либо мездозы. У данного типа датчиков есть недостаток – низкое по амплитуде выходное напряжение. В результате этого недостатка в систему регулирования вместе с полезным сигналом подается и паразитный сигнал помехи, который надо фильтровать. Фильтр, в свою очередь, по каналу обратной связи вносит задержку по времени, из-за чего колебательность контура увеличивается.

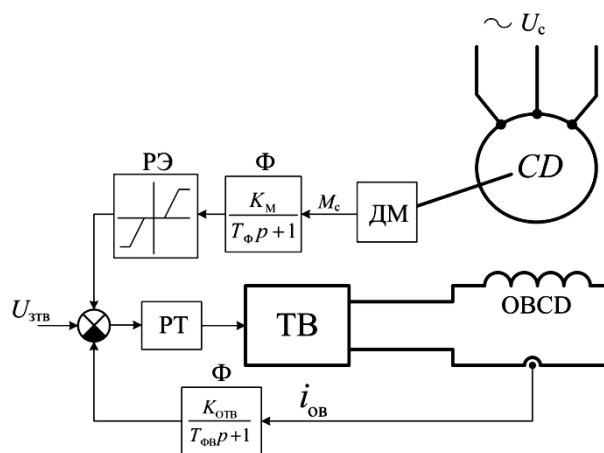


Рис. 1. Функциональная схема системы регулирования тока возбуждения с положительной обратной связью по моменту нагрузки:

РЭ – релейный элемент с зоной нечувствительности; Ф – фильтр; ДМ – датчик момента; РТ – регулятор тока; ТВ – тиристорный возбудитель

САРВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ПРОИЗВОДНОЙ АКТИВНОГО ТОКА ПО ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Датчиком тока в цепи обмотки возбуждения, как правило, служит шунт. Сигнал, пропорциональный