

УДК 62-83: 621.314.632
ББК 3291.074:3852.3

Г.П. ОХОТКИН

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИНТЕЗА РЕЛЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ САР ТОКА ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ И ДИАГОНАЛЬНОЙ КОММУТАЦИЯХ ТРАНЗИСТОРОВ ВП

Ключевые слова: система автоматического регулирования (САР), синтез систем автоматического регулирования, динамика импульсных преобразователей напряжения.

Разработана методика синтеза релейных регуляторов САР тока при симметричной и диагональной коммутации с переключением верхних транзисторов мостовой схемы вентильного преобразователя. Показано, что структурная схема САР тока с диагональной коммутацией ключей ВП с переключением верхних транзисторов моста, обладающая лучшими энергетическими показателями, имеет более сложную схему управления.

G. OKHOTKIN

DEVELOPMENT OF SYNTHESIS METHODS OF RELAY CONTROLLERS OF AUTOMATIC CURRENT CONTROL SYSTEMS WITH THE SYMMETRIC AND DIAGONAL SWITCHING TRANSISTOR GATE CONVERTER

Key words: automatic control system, synthesis of automatic control systems, dynamics of impulse voltage converters.

The methodology of synthesis of relay current control systems at symmetric and diagonal laws of commutation with the upper switching transistors of bridge circuit rectifier of gate Converter. It is shown that structural scheme of current control systems with diagonal switching keys gate converter with upper switching bridge transistors with better energy performance has a more complex control scheme.

Современные регулируемые электроприводы (РЭП) с высокими динамическими показателями строятся по системе подчиненного регулирования координат с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости. Контур тока представляет собой систему автоматического регулирования тока, в которой наиболее полно проявляются динамические свойства (дискретность и нелинейность) полупроводниковых преобразователей электроэнергии. Динамические свойства САР тока определяют динамические показатели электропривода, поэтому синтез САР тока на предельное быстродействие является актуальной задачей при проектировании высокودинамичных РЭП.

Задачи выбора структуры системы управления, основных ее элементов и необходимых значений параметров относятся к общим задачам синтеза, а синтез корректирующих устройств является частной задачей. Методика проектирования САР тока состоит из нескольких этапов, основными из которых являются: синтез структуры САР тока; синтез закона коммутации ключей вентильного преобразователя; синтез способа регулирования напряжения; синтез элементов структуры САР тока и моделирование процессов, протекающих в САР тока.

Существуют различные структуры системы управления САР тока: структура с управлением по отклонению (рис. 1), структура с управлением по отклонению и с положительной связью по падению напряжения на элементах нагрузки и комбинированная система управления. Анализ точности известных структур системы управления проведен в работе [1].

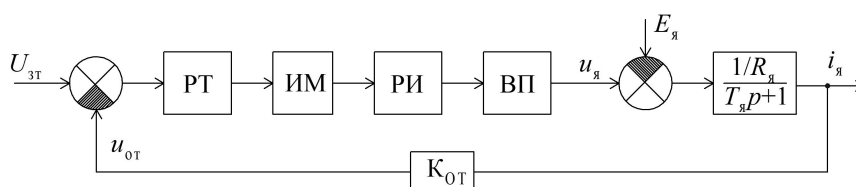


Рис. 1. Функциональная схема САР тока

Функциональная схема САР тока со структурой управления по отклонению состоит из регулятора тока (РТ), импульсного модулятора (ИМ), распределителя импульсов (РИ), вентильного преобразователя (ВП), якорной цепи двигателя постоянного тока (ДПТ), представленной инерционным звеном и датчика тока (ДТ) с коэффициентом передачи $K_{от}$ (рис. 1). В схеме приняты следующие обозначения: $U_{зт}$ – сигнал задания тока; $u_{от}$ – сигнал обратной связи, снимаемый с датчика тока; $U_я$ – напряжение якоря ДПТ; $E_я$ – противо-ЭДС двигателя; $i_я$ – ток якоря ДПТ.

В высокодинамичных РЭП находит широкое применение схема ВП, выполненная на четырех транзисторах VT1–VT4 с обратными диодами VD1–VD4 по так называемой мостовой схеме (рис. 2).

Известно множество различных законов коммутации транзисторных ключей мостовой схемы вентильного преобразователя. В работе [2] установлены наиболее эффективные законы коммутации ключей, применяемые на практике.

Регулирование среднего напряжения на выходе ВП (среднего тока нагрузки) осуществляется путем изменения длительностей открытого состояния транзисторных ключей. При этом наибольшее распространение получили методы регулирования с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), частотно-широтно-импульсной модуляцией (ЧШИМ) и релейное регулирование.

Благодаря простоте и надежности релейные способы регулирования с симметричным законом коммутации ключей мостовой схемы ВП получили широкое применение в САР тока. При симметричной коммутации возникают максимальные пульсации тока в нагрузке, что приводит к максимальным тепловым потерям мощности в ней. Минимальные пульсации тока в нагрузке и относительно простую схему управления обеспечивает диагональная коммутация с переключением верхнего транзистора моста ВП [2]. В релейных системах обычно применяется структура с управлением по отклонению, поэтому в дальнейшем остановимся на исследовании этой структуры как с симметричной коммутацией ключей мостовой схемы ВП, так и с диагональной коммутацией с переключением верхнего транзистора моста. В этом случае задача синтеза релейных регуляторов САР тока сводится к выбору статических характеристик релейных элементов. В литературе этот вопрос освещен недостаточно полно, поэтому синтез релейных регуляторов САР тока, обеспечивающих симметричную или диагональную коммутации с переключением, в частности верхнего транзистора мостовой схемы ВП, является актуальной задачей.

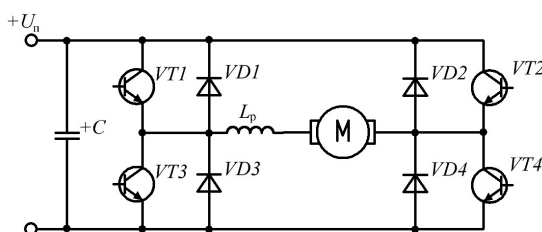


Рис. 2. Мостовая схема вентильного преобразователя

Целью данной работы является разработка методики синтеза релейных регуляторов САР тока при симметричной и диагональной коммутации с переключением верхних транзисторов мостовой схемы вентильного преобразователя.

Синтез регуляторов тока осуществляют с целью воспроизведения тока якоря ДПТ с высокой точностью во всех режимах работы электропривода при заданной коммутации ключей ВП. Для этого формируют задающее воздействие $U_{зт}$ САР тока, обеспечивающее работу мостовой схемы вентильного преобразователя в следующих режимах работы электропривода: разгон и вращение «Вперед»; генераторное торможение вращающегося «Вперед» двигателя; разгон и вращение «Назад»; генераторное торможение вращающегося «Назад» двигателя.

Для определенности принимаем, что при положительной полярности задающего воздействия $U_{зт}$ осуществляется вращение двигателя «Вперед» путем переключения диагональных ключей VT1 и VT4 моста ВП, а при отрицательной полярности $U_{зт}$ – вращение двигателя «Назад» переключением ключей VT2 и VT3.

Вначале выполним синтез релейного регулятора САР тока для симметричной коммутации ключей мостовой схемы вентильного преобразователя, заключающегося в поочередном переключении диагональных транзисторов моста [2]. В исходном состоянии все транзисторы моста выключены, электродвигатель находится в неподвижном состоянии, $E_{я} = 0$. Такое состояние мостовой схемы ВП обозначим как P0 – режим нуль.

Принцип действия релейных систем основан на переключении релейных элементов (РЭ) при пороговых значениях сигналов управления. Симметричная коммутация ключей ВП имеет три устойчивых состояния [3], два из которых рабочие. Исходя из числа устойчивых рабочих состояний ВП, введем два РЭ с нижним порогом переключения $U_{нп}$, предназначенным для включения транзисторов, и верхним порогом переключения $U_{вп}$ – для выключения транзисторов. Привязываем пороги переключения транзисторов ВП к задающему воздействию соотношениями: $U_{вп} = U_{зт} + \Delta U_1$, $U_{нп} = U_{зт} - \Delta U_2$. В частном случае $\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U$. Для перевода схемы ВП в рабочее состояние или в режим P0 вводим в систему управления специальный сигнал «Разрешение работы» логического типа через кнопку «Пуск».

Теперь рассмотрим возможный процесс формирования тока якоря релейной системой управления, имеющей два порога переключения. В момент времени $t = 0$ скачком подается $U_{зт}$ положительной полярности (рис. 3, а), что приводит к включению двух диагональных транзисторов VT1 и VT4 моста (рис. 2). Состояние схемы моста, когда включены два диагональных транзистора, обозначим как P2В – режим два «Вперед». При этом под действием входного напряжения моста $U_{п}$ (рис. 3, б) в обмотке якоря ДПТ начинают быстро возрастать ток якоря $i_{я}$ по экспоненциальному закону и сигнал обратной связи $u_{от} = K_{дт} i_{я}$, формируемый датчиком тока. При $u_{от} = U_{вп}$ схема управления формирует запирающие импульсы управления транзисторами VT1 и VT4 и отпирающие импульсы управления транзисторами VT2 и VT3 [4]. Для этого схема управления должна содержать релейный элемент РЭ1 с идеальной релейной характеристикой типа

$$U_{рЭ1} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{зт} + \Delta U - u_{от} \geq 0, \\ 0 & \text{при } U_{зт} + \Delta U - u_{от} < 0. \end{cases} \quad (1)$$

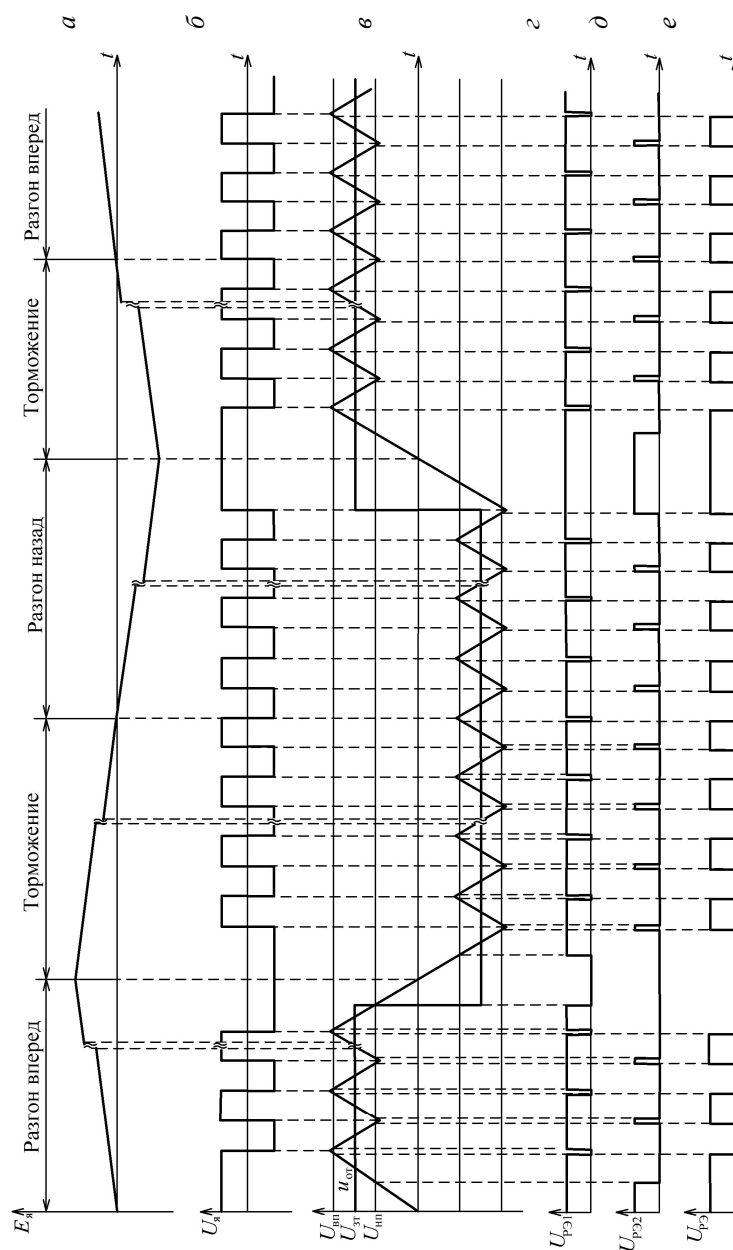


Рис. 3. Временные диаграммы работы САР тока

В реальной схеме ВП переключение полупроводниковых приборов происходит с некоторым запаздыванием относительно управляющего воздействия, поэтому на узких интервалах времени, где выходной сигнал датчика тока больше верхнего порога переключения $u_{от} > U_{вп}$, релейный элемент РЭ1 формирует узкие импульсы напряжения нулевого уровня, $U_{рэ1} = 0$ (рис. 3, з), определяющие моменты запираания транзисторов VT1 и VT4.

После выключения транзисторов VT1 и VT4 ВП в индуктивностях якорной цепи ДПТ возникает ЭДС самоиндукции, которая открывает обратные диоды VD2 и VD3 моста, и ток якоря под действием входного напряжения моста обратной полярности $-U_{п}$ (рис. 3, в) начинает быстро падать по экспоненциальному закону. Состояние схемы моста при этом обозначим как Р0ДВ – режим нуль с открытыми обратными диодами для направления вращения «Вперед». Когда $u_{от} = U_{вп}$, схема управления снова формирует отпирающие импульсы управления транзисторами VT1 и VT4 моста. В схеме управления нижний порог переключения будет формировать второй релейный элемент РЭ2 с характеристикой вида

$$U_{рэ2} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{зт} - \Delta U - u_{от} \geq 0, \\ 0 & \text{при } U_{зт} - \Delta U - u_{от} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

На интервалах времени, где $u_{от} < U_{вп}$, РЭ2 формирует узкие импульсы напряжения единичного уровня ($U_{рэ2} = 1$, рис. 3, д), определяющие моменты отпираания транзисторов VT1 и VT4. После открытия транзисторов VT1 и VT4 ток якоря $i_{я}$ ДПТ начинает быстро возрастать в режиме Р2В, далее процесс формирования тока якоря продолжается путем циклического переключения транзисторов с высокой частотой. При этом ток якоря пульсирует около заданного значения $U_{зт}$ внутри зоны, ограниченной порогами переключения $U_{вп}$ и $U_{нп}$. При $\Delta U_1 = \Delta U_2$ среднее значение тока якоря соответствует задающему воздействию $U_{зт} = K_{дт} I_{я}$.

На рис. 3, в представлен процесс формирования тока якоря ДПТ релейной системой управления во всех режимах работы электропривода при симметричной коммутации ключей ВП.

Временные диаграммы работы релейных элементов РЭ1 и РЭ2, приведенные на рис. 3, з и д, свидетельствуют о том, что передний фронт импульса $U_{рэ2}$ определяет момент подачи отпирающего импульса управления на транзисторы VT1 и VT4, а задний фронт импульса $U_{рэ1}$ – момент подачи запирающего импульса управления во всех режимах работы электропривода. Следовательно, перепад $U_{рэ2} = 0/1$ выходного напряжения РЭ2 с нуля в единицу формирует $U_{VT1} = U_{VT4} = 1$, отпирающий импульс управления транзисторами VT1 и VT4 ВП, до появления перепада $U_{рэ1} = 1/0$ выходного напряжения РЭ1 с единицы в нуль. Для формирования таких импульсов управления транзисторами VT1 и VT4 необходимо ввести в систему управления элемент памяти, запоминающий предшествующее состояние. Математически этот процесс описывается как

$$U_{VT1}^n = U_{VT4}^n = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{рэ2} = 0/1, U_{рэ1} = 1, \\ 0 & \text{при } U_{рэ1} = 1/0, U_{рэ2} = 0, \\ U_{VT1}^{n-1} = U_{VT4}^{n-1} & \text{при } U_{рэ1} = 1, U_{рэ2} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

При этом импульсы управления транзисторами VT1 и VT4 приобретают вид, представленный на рис. 3, *е*. В дальнейшем, инвертировав эти импульсы управления, получают импульсы управления для транзисторов VT2 и VT3 моста.

С учетом статических характеристик (1) и (2) релейных элементов РЭ1 и РЭ2 структурная схема управления САР тока принимает вид, представленный на рис. 4.

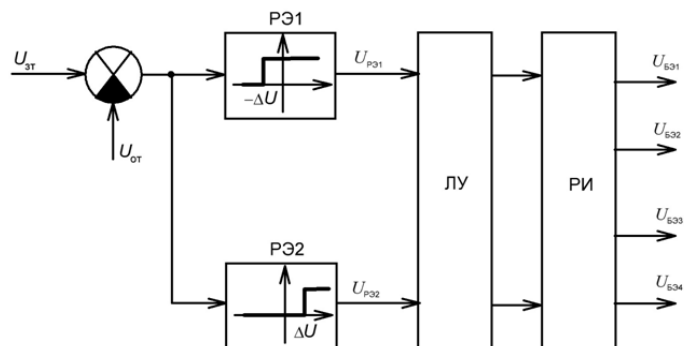


Рис. 4. Структурная схема управления САР тока

Схема содержит сумматор, два релейных элемента с одинаковыми релейными характеристиками, сдвинутыми на ΔU по оси $U_{вх}$ относительно начала координат в разные стороны, логическое устройство (ЛУ), осуществляющее формирование импульсов управления транзисторами, и распределитель импульсов управления транзисторами моста (РИ).

Схему управления САР тока можно упростить, используя для формирования импульсов управления транзисторами VT1 и VT4 двухпозиционное реле с гистерезисом, т.е. триггер Шмита. В этом случае схема управления САР тока будет отличаться от схемы, представленной на рис. 4, отсутствием РЭ1, РЭ2 и логического устройства, обеспечивающего запоминание предыдущих состояний импульсов управления. В результате этого схема управления становится проще и надежнее.

Далее выполним синтез релейного регулятора САР тока для диагональной коммутации с переключением верхнего транзистора моста ВП по рассмотренной выше методике. Принимается, что в исходном состоянии ВП находится в режиме Р0, формируется задающее воздействие типа «меандр», обеспечивающее работу ВП во всех режимах работы РЭП.

При диагональной коммутации осуществляется раздельное управление комплектами вентильных преобразователей, состоящих из диагональных транзисторов моста. Причем в работающем комплекте ВП переключаются верхние транзисторы моста при постоянно открытых нижних транзисторах. В результате этого в нагрузке моста протекает ток, содержащий минимальные пульсации [2].

Работающий комплект ВП при диагональной коммутации с переключением верхнего транзистора моста имеет три устойчивых состояния: Р2В – режим два «Вперед», когда включены транзисторы VT1 и VT4; Р1В – режим один «Вперед», когда включен только один транзистор VT4; Р0 – режим нуль, когда

транзисторы VT1 и VT4 выключены [5]. Для формирования этих устойчивых состояний вентильного преобразователя введем четыре релейных элемента. Первый релейный элемент РЭ1 служит для выключения верхнего транзистора моста при включенном нижнем транзисторе, РЭ2 – для выключения обоих транзисторов работающего комплекта, РЭ3 – для их включения и четвертый релейный элемент РЭ4 – для выбора работающего комплекта ВП.

Для определенности примем, что при $U_{p34} = 1$ обеспечивается формирование положительного тока якоря с переключением транзисторов VT1 и VT4 моста, а при $U_{p34} = 0$ – отрицательный ток якоря и переключение транзисторов VT2 и VT3. Для этого релейный элемент РЭ4 должен иметь идеальную релейную характеристику вида

$$U_{p34} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{3т} \geq 0, \\ 0 & \text{при } U_{3т} < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Релейный элемент РЭ3, предназначенный для включения диагональных транзисторов моста, формирует $U_{пн}$ – нижний порог переключения транзисторов моста, аналогично РЭ2 – для симметричной коммутации. Для этого характеристика РЭ3 должна представляться как

$$U_{p33} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{3т} - \Delta U - u_{от} \geq 0, \\ 0 & \text{при } U_{3т} - \Delta U - u_{от} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Релейный элемент РЭ2 формирует $U_{вп}$ – верхний порог (как в РЭ1 при симметричной коммутации), выключающий транзисторы работающего комплекта ВП. В этом случае характеристика релейного элемента РЭ2 принимает вид

$$U_{p32} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{3т} + \Delta U - u_{от} \geq 0, \\ 0 & \text{при } U_{3т} + \Delta U - u_{от} < 0. \end{cases} \quad (6)$$

Релейный элемент РЭ1 переводит схему моста ВП в режим P1B, который возникает после режима P2B перед режимом P0 при быстрых изменениях управляющего воздействия и в тормозных режимах работы электропривода. При стационарных управляющих воздействиях формирование тока якоря ДПТ осуществляется чередованием режимов P2B и P1B. При этом ток в цепи якоря циркулирует в короткозамкнутом контуре с противо-ЭДС двигателя и имеет небольшие пульсации. Для этого релейный элемент РЭ1 должен формировать $U_{пн}$ – порог переключения, расположенный между нижним и верхним порогами, т.е. расположенный в интервале $U_{пн} < U_{пн} < U_{вп}$. В релейных системах, осуществляющих регулирование максимального тока якоря, порог переключения РЭ1 равен задающему воздействию, $U_{пн} = U_{3т}$, т.е. $\Delta U = 0$. При этом РЭ1 должен иметь характеристику типа

$$U_{p31} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{3т} - u_{от} \geq 0, \\ 0 & \text{при } U_{3т} - u_{от} < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Пусть в момент времени $t = 0$ скачком подается $U_{3т}$ положительной полярности ($U_{p34} = 1$). При $U_{3т} > \Delta U$ релейный элемент РЭ3 перепадом $U_{p33} = 0/1$ с нуля в единицу открывает транзисторы VT1 и VT4 моста, и ток якоря двигателя $i_{я}$ в режиме P2B начинает быстро увеличиваться под действием входного напряжения ВП $U_{п}$.

Когда сигнал обратной связи $u_{от}$, снимаемый с выхода датчика тока, достигнет значения задающего воздействия $U_{3т} = u_{от}$, релейный элемент РЭ1 перепадом

$U_{p31} = 0/1$ переводит схему ВП из режима P2B в P1B. В режиме P1B ток якоря i_a ДПТ медленно падает через открытый транзистор VT4 и диод VD3.

Когда $u_{от} = U_{нп}$, релейный элемент РЭ3 перепадом $U_{p33} = 0/1$ открывает транзисторы VT1, и ток якоря двигателя i_a в режиме P2B снова быстро увеличивается. Далее процесс регулирования тока якоря на заданном уровне $U_{зт}$ продолжается циклическим переключением транзистора VT1 с высокой частотой. При этом ток якоря i_a пульсирует около заданного значения. Такой процесс регулирования тока якоря наблюдается при постоянных или малых изменениях задающего воздействия $U_{зт}$.

При больших скоростях изменения задающего воздействия $U_{зт}$ или в режиме генераторного торможения двигателя, когда противо-ЭДС двигателя и ток якоря направлены согласно, ток якоря в короткозамкнутой цепи схемы ВП начинает возрастать в режиме P1B. При этом быстрый спад тока якоря схемой ВП может быть обеспечен выключением транзистора VT4 и переводом схемы моста в режим P0. Для этого в схему управления вводится релейный элемент РЭ2, который перепадом $U_{p32} = 0/1$ переводит схему ВП как из режима P2B, так и из режима P1B в режим P0.

Таким образом, ВП с диагональной коммутацией с переключением верхнего транзистора моста обладает в отличие от симметричного закона коммутации лучшими энергетическими показателями.

Исходя из характеристик релейных элементов (4)–(7) разработана структурная схема управления САР тока, представленная на рис. 5.

Схема содержит сумматор, релейные элементы РЭ1–РЭ4, включенные в состав блока релейных элементов (БРЭ), дискретное логическое управляющее устройство (ДЛУУ). Релейные элементы РЭ1–РЭ3 выполняют функцию релейного регулятора тока (РРТ). Релейный элемент РЭ4 служит для задания направления вращения двигателя. ДЛУУ осуществляет формирование и распределение импульсов управления транзисторами вентильного преобразователя.

Выводы. 1. В работе разработана методика синтеза релейных регуляторов САР тока при симметричной и диагональной коммутации с переключением верхних транзисторов мостовой схемы вентильного преобразователя.

2. Структурная схема САР тока с диагональной коммутацией ключей ВП с переключением верхних транзисторов моста, обладающая лучшими энергетическими показателями, имеет более сложную схему управления.

Литература

1. Охоткин Г.П. Анализ систем регулирования тока // Электромеханика. 1992. № 3. С. 66–70.
2. Охоткин Г.П., Романова Е.С. Анализ законов коммутации ключей мостовой схемы импульсного преобразователя // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 142–149.

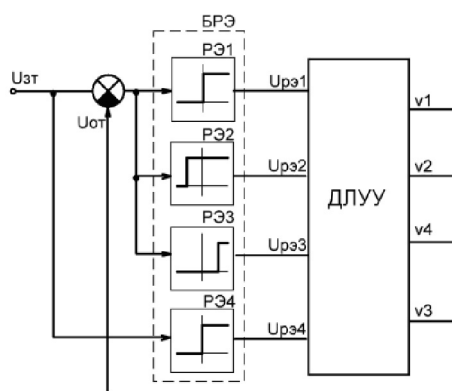


Рис. 5. Структурная схема управления САР тока

3. Охоткин Г.П., Романова Е.С. Разработка математической модели симметричного закона коммутации ключей мостовой схемы вентильного преобразователя // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. С. 180–186.

4. Охоткин Г.П., Романова Е.С. Синтез релейных регуляторов САР тока с симметричным законом коммутации ключей мостового преобразователя // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. С. 187–194.

5. Охоткин Г.П. Способ регулирования тока якоря с высокими динамическими показателями // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. С. 129–136.

ОХОТКИН ГРИГОРИЙ ПЕТРОВИЧ – доктор технических наук, профессор, декан факультета радиоэлектроники и автоматики, заведующий кафедрой автоматики и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elius@list.ru).

OKHOTKIN GRIGORY – doctor of technical sciences, professor, dean of Radioelectronics and Automatics Faculty, head of Chair of Automation and Management in Technical Systems, Chuvash state University, Russia, Cheboksary.

УДК 62-83: 621.314.632

ББК 3852.3:396

Г.П. ОХОТКИН

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИНТЕЗА ДИСКРЕТНОГО ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА САР ТОКА

Ключевые слова: импульсный преобразователь напряжения, мостовая схема вентильного преобразователя, система автоматического регулирования тока (САР), синтез систем автоматического регулирования.

Разработана методика синтеза дискретного логического управляющего устройства САР тока с диагональным законом коммутации ключей мостовой схемы вентильного преобразователя с переключением верхних транзисторов моста. В ходе синтеза обеспечивается получение минимизированной схемы дискретного логического управляющего устройства.

G. OKHOTKIN DEVELOPMENT OF SYNTHESIS METHODS OF DISCRETE LOGICAL CONTROL DEVICE OF THE SYSTEMS OF AUTOMATIC CURRENT CONTROL

Key words: pulse voltage Converter, bridged valve Converter, a system of automatic current control, synthesis of automatic control systems.

The methodology of synthesis of discrete logic control device automatic current control with diagonal law switching keys bridge circuit rectifier inverter with upper switching transistors bridge has been developed. In the course of synthesis the minimized schemes of discrete logical control device is provided.

Система автоматического регулирования (САР) тока находит широкое применение в качестве внутреннего контура регулирования в импульсных преобразователях постоянного и переменного тока. В САР тока существуют различные законы коммутации ключей вентильных преобразователей (ВП), выполненных на четырех транзисторах с обратными диодами, и способы регулирования тока нагрузки [2, 3]. Благодаря простоте и надежности релейные способы регулиро-