

УДК 62-83: 621.314.632

ББК 31.291

Г.П. ОХОТКИН, Е.С. РОМАНОВА

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛОВЫХ СХЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ключевые слова: импульсный преобразователь, транзисторный импульсный преобразователь, импульсный преобразователь постоянного напряжения, транзисторный электропривод постоянного тока.

Проведен сравнительный анализ силовых схем импульсных преобразователей для электропривода постоянного тока и их статических характеристик. Приведенные преимущества и недостатки схем позволяют обоснованно выбрать схему электропривода.

G.P. OKHOTKIN, E.S. ROMANOVA COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER CIRCUITS OF PULSED CONVERTERS FOR DC MOTOR

Key words: pulse converter, transistor pulse converter, DC pulse converter, transistor DC motor.

Was made a comparative analysis of the power circuits of pulse converters for DC motor and its static characteristics. Adducting advantages and disadvantages of schemes admit reasonably choose the electric circuit.

Построение оптимальной системы управления импульсным преобразователем постоянного напряжения (ИППН) возможно только при условии, когда управляющий вентилями сигнал формируется системой управления на основе полной информации о состоянии объекта управления. Состояние объекта управления – двигателя постоянного тока характеризуется двумя переменными: током якоря и угловой скоростью вращения. Для контролирования переменных состояния двигателя применяются датчики тока и скорости. Современные транзисторные электроприводы постоянного тока строятся по схеме подчиненного регулирования координат с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости. Бывают нереверсивные и реверсивные электроприводы.

Нереверсивные электроприводы, в свою очередь, могут иметь схему торможения или могут быть построены без схемы торможения. В последнем случае торможение осуществляется самовыбегом, т.е. под действием статической нагрузки.

В начале рассмотрим функциональную схему транзисторного нереверсивного электропривода без схемы торможения (рис. 1, а). Она состоит из автомата К; согласующего трансформатора TV ; выпрямителя В, построенного по мостовой схеме; емкостного фильтра С; регулирующего транзистора VT ; обратного диода VD ; внешнего реактора L_p ; двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения M ; датчика тока ДТ; системы управления СУ; тахогенератора BR .

Регулирующий транзистор VT и обратный диод VD представляют собой простейшую схему вентильного преобразователя (ВП) постоянного тока в постоянный ($DC-DC$ -преобразователь) [1, 2]. Временные диаграммы работы $DC-DC$ -преобразователя в установившемся режиме работы электропривода (ЭП) представлены на рис. 1, б и в.

Рассмотрим работу $DC-DC$ -преобразователя в режиме непрерывного тока (РНТ). После включения регулирующего транзистора VT в момент времени $t = nT$ (рис. 1, б) под действием входного напряжения U_n $DC-DC$ -преобразователя в обмотке якоря ДПТ увеличивается ток по экспоненте в цепи: зажим плюс источника питания – транзистор VT – реактор L_p – обмотка якоря ДПТ – датчик тока ДТ – зажим минус источника питания. Противо-ЭДС E_y вращающегося с угловой скоростью ω двигателя направлена встречно U_n . Длительность открытого состояния t_0 регулирующего транзистора VT определяется схемой управления в функции сигналов обратных связей по току $U_{от}$ и скорости U_{oc} . В

момент времени $t = nT + t_0$ система управления выключает регулирующий транзистор VT . При этом под воздействием ЭДС самоиндукции, возникающей на катушке индуктивности якорной цепи, открывается обратный диод VD , и ток якоря начинает спадать по экспоненте в цепи: реактор L_p – обмотка якоря ДПТ – датчик тока ДТ – диод VD – реактор L_p . В момент времени $t = (n + 1)T$ схема управления снова открывает регулирующий транзистор VT , и ток якоря начинает расти по экспоненте. Далее процесс регулирования тока и напряжения якорной цепи ДПТ продолжается циклическим переключением регулирующего транзистора VT с высокой частотой.

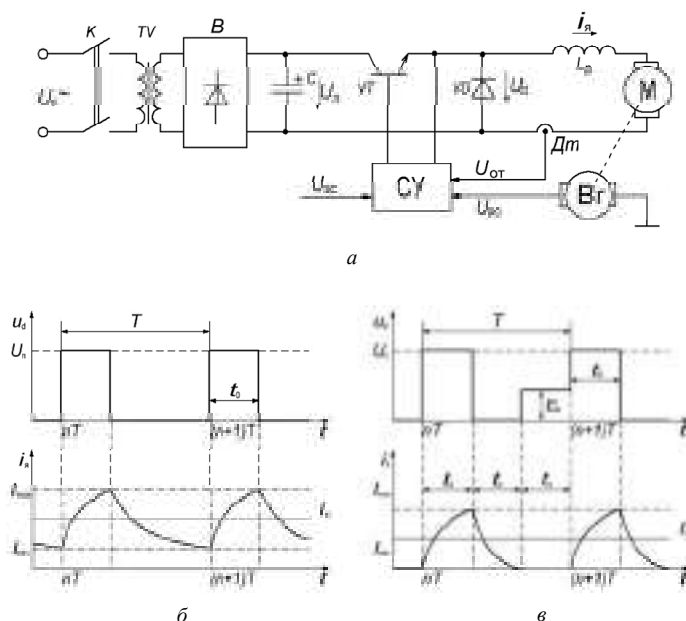


Рис. 1

В РНТ ток якоря изменяется от I_{\min} до I_{\max} и имеет пульсирующий характер (рис. 1, б). Среднее значение пульсирующего тока якоря $I_{\text{я}} > 0$ создает вращающий (электромагнитный) момент в двигателе, а высокочастотные пульсации тока лишь нагревают обмотки якоря ДПТ. При разных направлениях тока якоря $I_{\text{я}}$ и противо-ЭДС $E_{\text{я}}$ имеет место двигательный режим работы машины (M), а при одинаковых направлениях – генераторный.

Среднее значение напряжения якорной цепи определяется соотношением

$$U_d = \frac{1}{T} \int_{nT}^{nT+t_0} U_n dt = \frac{U_n}{T} t_0, \quad (1)$$

где U_n – значение входного напряжения DC-DC-преобразователя; t_0 – длительность открытого состояния регулирующего транзистора VT ; T – интервал (период) дискретности.

Электромагнитные процессы в якорной цепи ДПТ в установившемся режиме работы преобразователя через средние значения переменных описываются уравнением

$$U_d = E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{я}}$ – противо-ЭДС двигателя; $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление якорной цепи; $I_{\text{я}}$ – среднее значение тока якоря.

При проектировании электропривода важно выяснить его динамические и статические характеристики. К статическим характеристикам обычно относят механические и регулировочные характеристики.

Сравнительный анализ характеристик различных систем удобнее проводить, когда их параметры выражаются в относительных единицах. Для этого введем относительные величины: $\tau_0 = t_0/T$ – относительная длительность открытого состояния регулирующего транзистора; $v = U_d/U_n$ – относительное среднее значение выходного напряжения преобразователя; $\varepsilon = E_{\text{я}}/U_n$ – относительная противо-ЭДС двигателя; $I = R_{\text{я}}E_{\text{я}}/U_n$ – относительный средний ток якоря, приняв за базовые переменные $U_{\text{б}} = U_n$, $T_{\text{б}} = T$ – базовые напряжения и время.

Тогда относительное среднее значение напряжения якоря из (1) выражается как

$$v = \tau_0. \tag{3}$$

Зависимость относительного среднего значения выходного напряжения преобразователя v от относительной длительности открытого состояния регулирующего транзистора τ_0 , т.е. $v = f(\tau_0)$ называется регулировочной характеристикой DC-DC-преобразователя. Регулировочная характеристика преобразователя (3) располагается в первом квадранте координатной плоскости (τ_0, v) и представляет собой прямую (точнее отрезок прямой $0 \leq v \leq 1$), проходящую через начало координат. Следовательно, в простейшем DC-DC-преобразователе возможна только однополярная модуляция ($0 \leq \tau_0 \leq 1$), что приводит к регулированию среднего напряжения в относительных единицах в диапазоне $0 \leq v \leq 1$.

Изменением напряжения якорной цепи регулируют скорость двигателя постоянного тока. Для получения регулировочной характеристики ДПТ уравнение (2) представляют в относительных единицах в виде

$$\varepsilon = v - I, \tag{4}$$

где противо-ЭДС двигателя пропорциональна угловой скорости $E_{\text{я}} = K\Phi\omega$, при $\Phi = \text{const}$, т.е. $\varepsilon \equiv \omega$.

Регулировочная характеристика $\varepsilon = f(v)|_{I = \text{const}}$ ДПТ по (4) представляет собой семейство параллельных прямых, расположенных в первом и четвертом квадрантах координатной плоскости (v, ε) , зависящих от тока якоря I . С учетом того, что рассматриваемый неререверсивный электропривод в состоянии работать с нагрузкой, характеризующейся только реактивным моментом сопротивления, регулировочная характеристика ДПТ (4) располагается только в первом квадранте координатной плоскости (v, ε) .

Из регулировочных характеристик (3), (4) получают уравнение регулировочной характеристики системы DC-DC-преобразователь – ДПТ (ВП–ДПТ) в виде

$$\varepsilon = \tau_0 - I. \tag{5}$$

Регулировочные характеристики $\varepsilon = f(\tau_0)|_{I = \text{const}}$ по (5) имеют вид параллельных прямых, расположенных только в первом квадранте координатной плоскости (τ_0, ε) . Из характеристик (5) следует, что скорость ДПТ ($\varepsilon \equiv \omega$) регулируется изменением длительности открытого состояния регулирующего транзистора τ_0 при заданной нагрузке I .

Электромеханической характеристикой системы ВП–ДПТ называется зависимость относительного среднего напряжения якорной цепи v от относительного среднего тока якоря I , т.е. $v = \varphi(I)|_{\varepsilon = \text{const}}$ при заданной скорости двигателя $\varepsilon \equiv \omega$. Эти характеристики представляют собой семейство параллельных прямых с постоянным углом наклона к оси абсцисс, расположенных в первом квадранте координатной плоскости (I, v) . Угол наклона определяется активным сопротивлением якорной цепи.

В режиме прерывистого тока (РПТ) ток якоря на интервале дискретности спадает до нуля. Временные диаграммы, представленные на рис. 1, *в* отличаются от временных диаграмм РНТ наличием интервала бестоковой паузы t_n . На интервале бестоковой паузы напряжение якорной цепи соответствует значению $E_{\text{я}}$, поэтому среднее значение напряжения якорной цепи определяется соотношением

$$U_d = \frac{1}{T} \int_{nT}^{nT+t_0} U_n dt + \frac{1}{T} \int_{(n+1)T-t_n}^{(n+1)T} E_{\text{я}} dt = \frac{U_n}{T} t_0 + \frac{U_n}{T} t_n, \tag{6}$$

где t_n – длительность интервала бестоковой паузы.

Переходя в уравнении (6) к относительным единицам, с учетом (4) получают уравнение регулировочной характеристики системы ВП–ДПТ в виде

$$\varepsilon = \tau_0 + \varepsilon\tau_n - I, \quad (7)$$

где $\tau_n = t_n / T$ – относительная длительность интервала бестоковой паузы.

Получить выражения для определения τ_n в явном виде не представляется возможным. Поэтому построение регулировочных характеристик системы ВП–ДПТ в РПТ осуществляют с помощью ее электромеханических характеристик. В связи с этим регулировочные характеристики системы ВП–ДПТ при прерывистых токах становятся нелинейными.

Электромеханические характеристики системы ВП–ДПТ в режиме прерывистого тока также нелинейны. Они представляют собой семейство кривых линий, исходящих из точки идеального холостого хода и заканчивающихся на границе прерывистого тока в точках, где начинаются характеристики режима непрерывного тока. Электромеханические характеристики в режиме прерывистого тока обладают малой жесткостью по сравнению с характеристиками непрерывного тока.

Нелинейность статических характеристик системы ВП–ДПТ в РПТ снижает точность регулирования и устойчивость электропривода. Поэтому должны быть предусмотрены меры, либо исключающие режим прерывистых токов, либо линеаризирующие регулировочные характеристики.

К достоинствам рассматриваемой схемы следует отнести предельно малое число элементов силовой части преобразователя.

Недостатками такой системы являются: отсутствие режимов генераторного торможения двигателя, что отрицательно сказывается на динамических свойствах электропривода; наличие нелинейных участков механических характеристик, имеющих малую жесткость; наличие нелинейных участков регулировочных характеристик; повышенные дополнительные потери в двигателе при работе в режиме прерывистых токов.

Теперь рассмотрим неререверсивную схему электропривода с генераторным торможением двигателя (рис. 2, а). Функциональная схема неререверсивной полумостовой схемы *DC-DC*-преобразователя состоит из двух простейших схем вентилярных преобразователей (первая построена на транзисторе *VT2* и диоде *VD1*, а вторая – на *VT1* и *VD2*), где вторая схема ВП подключена встречно-параллельно двигателю. Такая схема включения ВП обеспечивает протекание в якоре двигателя реверсивного (биполярного) тока, поэтому назовем ее реверсивным по току преобразователем. ИППН, в отличие от схемы, приведенной на рис. 1, а, снабжается узлом сброса энергии УС для предотвращения перенапряжений на конденсаторе *C* в тормозных режимах работы двигателя.

Первая простейшая схема ВП, выполненная на транзисторе *VT2* и диоде *VD1*, служит для регулирования среднего значения напряжения на якоре двигателя и поэтому называется разгонным комплектом ВП. Второй комплект ВП, выполненный на транзисторе *VT1* и диоде *VD2*, служит для генераторного торможения ДПТ и может быть назван тормозным комплектом ВП. Бывает совместное и раздельное управление комплектами ВП.

При раздельном управлении комплектами ВП временные диаграммы работы рассматриваемого *DC-DC*-преобразователя в двигательном режиме работы ДПТ полностью совпадают с временными диаграммами работы схемы, представленной на рис. 1, а. Статические характеристики системы ВП–ДПТ в режиме непрерывного тока линейны, а в режиме прерывистого тока нелинейны. Переход в генераторный режим торможения электропривода схемой осуществляется после спада тока якоря до нуля.

Одним из недостатков раздельного управления комплектами ВП является нелинейность статических характеристик в режиме прерывистых токов. Совместное управление комплектами ВП позволяет исключить интервал бестоковой паузы и линеаризовать статические характеристики системы ВП–ДПТ. Поэтому в дальнейшем подробнее остановимся на рассмотрении совместного управления комплектами ВП.

Временные диаграммы работы ВП в режиме постоянного тока якоря с положительным средним значением ($i_a > 0$, $I_a > 0$) приведены на рис. 2, б. Формирование кривых тока и напряжения в этом режиме осуществляется разгонным комплектом ВП, работа которого подробно описана выше (рис. 1, б). Режим характеризуется тем, что в течение всего интервала дискретности мгновенный и средний ток якоря больше нуля, т.е. $i_a > 0$ и $I_a > 0$. Средний ток якоря I_a и противо-ЭДС E_a двигателя направлены встречно, поэтому машина M работает в двигательном режиме.

Работу вентильного преобразователя в режиме переменного тока якоря с положительным средним значением ($I_a > 0$) иллюстрируют временные диаграммы, представленные на рис. 2, в. При совместном управлении комплектами ВП на возможных интервалах бестоковой паузы тормозной комплект ВП формирует в якоре двигателя ток, совпадающий по направлению с противо-ЭДС E_a . Для этого отпирающие импульсы на транзисторы комплектов подаются в противофазе, т.е. когда открыт транзистор $VT2$ транзистор $VT1$ закрыт и наоборот.

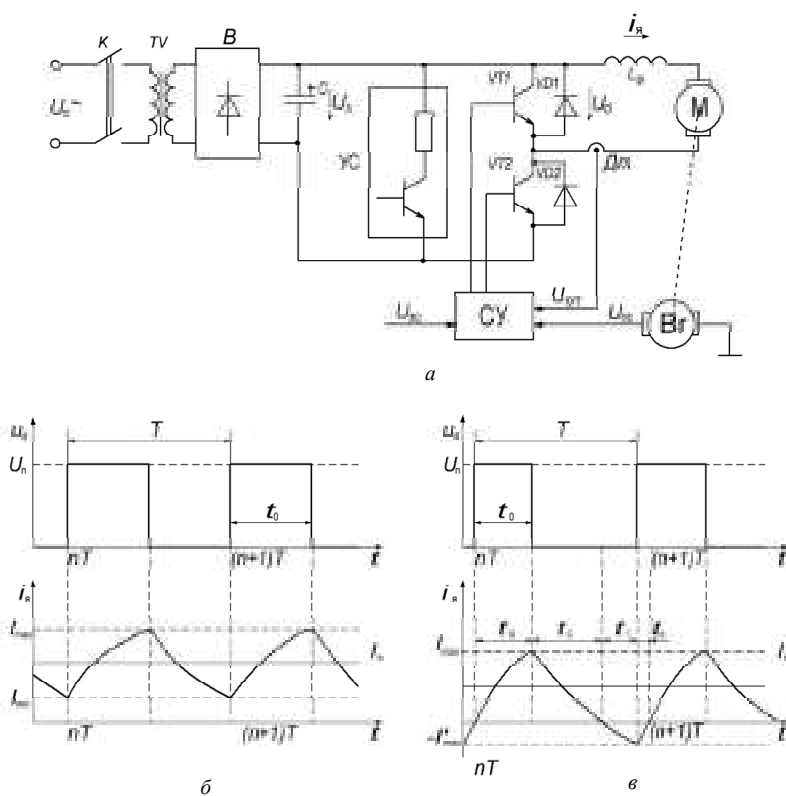


Рис. 2

В результате этого в якоре двигателя протекает переменный ток, обеспечивающий генераторное притормаживание двигателя на интервале $t_r + t_d$. При этом исчезает интервал бестоковой паузы, снижаются средний ток якоря и коэффициент использования двигателя по моменту. Несмотря на наличие отрицательного мгновенного тока якоря на интервале $t_r + t_d$, среднее значение тока якоря на интервале дискретности преобразователя больше нуля, т.е. $I_a > 0$. Под действием среднего тока якоря положительной полярности, направленного встречно противо-ЭДС E_a , в двигателе создается электромагнитный момент и осуществляется вращение его вала.

При уменьшении системой управления длительности t_0 открытого состояния транзистора $VT2$ уменьшается интервал t_c спада тока якоря до нуля, увеличиваются интервалы t_r и t_d , снижается среднее значение тока якоря I_a . Когда среднее значение тока якоря достигнет нулевого значения $I_a = 0$, машина M переходит в так называемый режим работы идеального холостого хода. Протекающий при этом в обмотках якоря переменный ток нагревает их и не создает в машине вращающего момента.

Дальнейшее снижение длительности t_0 открытого состояния транзистора $VT2$ приводит к изменению знака среднего тока якоря $I_a < 0$ и переводу машины M в режим генераторного торможения, состоящего из интервалов динамического t_r и рекуперативного t_d торможений. Протекающий в обмотках якоря переменный ток с отрицательным средним значением создает во вращающейся машине тормозной момент, и начинается торможение двигателя. Интенсивность торможения ДПТ определяется значением среднего тока якоря.

При рекуперативном торможении двигателя накопленная кинетическая энергия преобразуется машиной в электрическую, которая передается через шины питания в источник питания и накапливается на ёмкостном фильтре C . Это может привести к повышению напряжения питания U_n . Для ограничения напряжения питания U_n в тормозных режимах работы электропривода вводят узел сброса УС, содержащий полупроводниковый ключ, балластный резистор, схему управления ключом и схему контроля напряжения на ёмкостном фильтре C . При превышении напряжения на ёмкостном фильтре свыше 5-10% от номинального значения УС начинает сброс избыточной энергии в балластный резистор путем переключения ключа с высокой частотой. При этом осуществляются разряд конденсатора C на балластный резистор и снижение напряжения U_n до номинального значения.

Таким образом, в формируемом вентильным преобразователем пульсирующем токе якоря можно различить четыре режима: положительного постоянного тока, когда мгновенный и средний ток якоря больше нуля ($i_a > 0$, $I_a > 0$); переменного тока с положительным I_a , когда мгновенный ток переменный, а среднее значение тока якоря больше нуля ($\sim i_a$, $I_a > 0$); переменного тока с отрицательным I_a ($\sim i_a$, $I_a < 0$); отрицательного постоянного тока ($i_a < 0$, $I_a < 0$). При этом, когда в машине M протекает постоянный или переменный ток с $I_a > 0$, она работает в двигательном режиме, а когда протекает переменный или постоянный ток с $I_a < 0$, она переходит в режим генераторного торможения, состоящего из интервалов динамического и рекуперативного торможений.

Среднее значение напряжения якорной цепи в режиме постоянного тока определяется (1), а в режиме переменного тока как

$$U_d = \frac{1}{T} \int_{nT}^{nT+t_0} U_n dt + \frac{1}{T} \int_{(n+1)T-t_d}^{(n+1)T} U_n dt = \frac{U_n}{T} t_0 + \frac{U_n}{T} t_d, \quad (8)$$

или в относительных величинах

$$v = \tau_0 + \tau_d, \quad (9)$$

где $\tau_d = t_d/T$ – относительная длительность открытого состояния диода $VD2$.

Схема $DC-DC$ -преобразователя обеспечивает однополярную модуляцию ($0 \leq \tau_0 \leq 1$), и поэтому регулировочная характеристика располагается в первом квадранте координатной плоскости и имеет линейную зависимость во всех режимах тока. Внешняя характеристика $DC-DC$ -преобразователя располагается в первом и во втором квадрантах координатной плоскости, так как преобразователь обеспечивает протекание реверсивного тока якоря и имеет также линейную зависимость.

К достоинствам схемы относятся: линейность статических характеристик системы ВП-ДПТ, которая достигается в схеме исключением режима прерывистых токов; высокое быстродействие электропривода, которое достигается обеспечением генераторного торможения машины.

К недостаткам относятся: относительно большое число элементов силовой части преобразователя, приводящее к усложнению схемы управления; снижение коэффициента использования машины в режиме переменного тока якоря.

Далее рассмотрим основные реверсивные схемы транзисторных электроприводов постоянного тока, которые могут быть выполнены с помощью одного U_n или двух источников постоянного напряжения U_{n1} и U_{n2} . Сначала рассмотрим две реверсивные схемы транзисторных электроприводов постоянного тока с двумя источниками постоянного напряжения. Первая функциональная схема электропривода, представленная на рис. 3, выполнена с помощью реверсивной полумостовой схемы $DC-DC$ -преобразователя, состоящего из двух транзисторов $VT1, VT2$ и диодов $VD1, VD2$. Реверсивная схема образована встречно-параллельным включением по выходу двух комплектов неревверсивных ВП, выполненных по простейшей схеме. Регулирующий транзистор $VT1$ и диод $VD2$, представляющие собой первый комплект ВП, формируют регулируемое среднее напряжение положительной полярности в якорной цепи двигателя для направления вращения «Вперед», а транзистор $VT2$ и диод $VD1$ (второй комплект ВП) – отрицательной полярности для направления вращения «Назад».

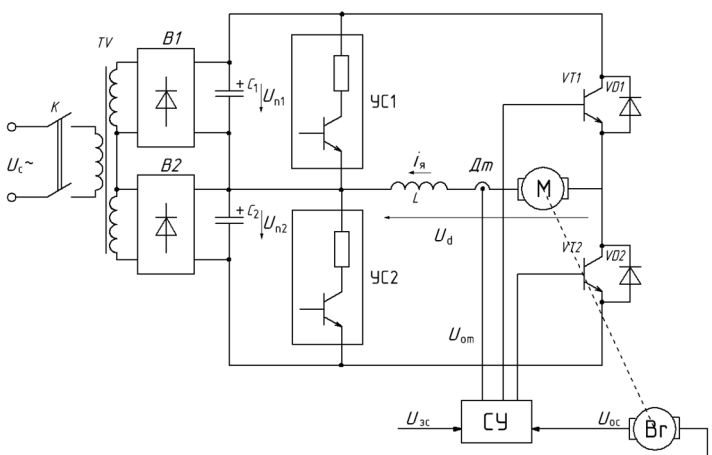


Рис. 3

Различают два режима управления комплектами ВП – совместное и раздельное. При совместном управлении отпирающие импульсы подаются на транзисторы как одного, так и другого комплекта, обеспечивающих их переключение в противофазе, т.е. если замкнут ключ $VT1$, то разомкнут ключ $VT2$, и наоборот. При раздельном управлении комплектами ВП отпирающие импульсы подаются на транзистор комплекта, участвующего в данный момент в преобразовании тока (работающий комплект), а транзистор неработающего комплекта закрыт.

Среднее напряжение якорной цепи двигателя в РНТ определяется как

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^{nT+t_0} U_{n1} dt + \frac{1}{T} \int_{nT+t_0}^{(n+1)T} -U_{n2} dt = \frac{U_{n1}}{T} t_0 - \frac{U_{n2}}{T} (T - t_0) = \frac{U_{n1} + U_{n2}}{T} t_0 - U_{n2}. \quad (10)$$

Переходя к относительным единицам при $U_{n1} = U_{n2} = U_n$ получаем

$$v = 2\tau_0 - 1. \quad (11)$$

При изменении в (10) и (11) длительности открытого состояния транзистора $VT1$ в диапазоне $0 \leq t_0 \leq T$ ($0 \leq \tau_0 \leq 1$) изменяется полярность среднего напряжения якорной цепи. Так, при $t_0 = 0$ ($\tau_0 = 0$) получаем $U_d = -U_{n2}$ ($v = -1$), при $t_0 = T/2$ ($\tau_0 = 1/2$) имеем $U_d = (U_{n1} - U_{n2})/2|_{U_{n1} = U_{n2}} = 0$ ($v = 0$) и при $t_0 = T$ ($\tau_0 = 1$) получаем $U_d = U_{n1}$ ($v = 1$). Отсюда следует, что регулировочная характеристика $DC-DC$ -преобразователя $v = f(\tau_0)$, представ-

ленная в относительных единицах, располагается в первом и четвертом квадрантах координатной плоскости (τ_0, v) и проходит через нулевое значение относительного среднего напряжения $v = 0$ при $\tau_0 = 1/2$. Это означает, что *DC-DC*-преобразователь осуществляет двухполярную модуляцию, передавая энергию из машины *M* в источник входного напряжения $U_{п2}$ при $0 \leq \tau_0 \leq 1/2$, и наоборот – от источника $U_{п1}$ в машину при $1/2 \leq \tau_0 \leq 1$.

Из регулировочных характеристик (11) и (4) получаем уравнение регулировочной характеристики системы ВП–ДПТ в виде

$$\varepsilon = 2\tau_0 - 1 - I. \quad (12)$$

Регулировочные характеристики $\varepsilon = f(\tau_0)|_{I = \text{const}}$ по (12) имеют вид параллельных прямых, расположенных в первом и четвертом квадрантах координатной плоскости (τ_0, ε) и проходят через нулевое значение относительного среднего напряжения $v = 0$ при $\tau_0 = 1/2$ и $I = 0$. Из характеристик (12) следует, что скорость ДПТ ($\varepsilon \equiv \omega$) регулируется изменением длительности открытого состояния регулирующего транзистора τ_0 при заданной нагрузке *I*.

Электромеханические характеристики системы ВП–ДПТ $v = \varphi(I)|_{\varepsilon = \text{const}}$, создаваемые первым комплектом ВП и машиной, представляют собой семейство параллельных прямых с постоянным углом наклона к оси абсцисс, расположенные в первом и четвертом квадрантах координатной плоскости (I, v) , так как схема первого комплекта ВП реверсирует только среднее напряжение якорной цепи, а средний ток якоря не изменяет полярность. Электромеханические характеристики системы ВП–ДПТ, создаваемые вторым комплектом ВП и машиной, располагаются в третьем и во втором квадрантах координатной плоскости (I, v) . Поэтому в целом электромеханические характеристики системы ВП–ДПТ будут расположены во всех четырех квадрантах.

При раздельном управлении комплектами ВП для направления вращения двигателя «Вперед» транзистор *VT2* постоянно закрыт, и поэтому работа преобразователя возможна в режиме прерывистого тока. При этом ток якоря на интервале дискретности падает до нуля. В этом случае регулировочные и электромеханические характеристики системы ВП–ДПТ становятся нелинейными.

При совместном управлении комплектами ВП формируется переменный ток якоря, исключается интервал бестоковой паузы, что линеаризует статические характеристики системы ВП–ДПТ. При этом также обеспечивается генераторное торможение машины, что значительно увеличивает быстродействие электропривода.

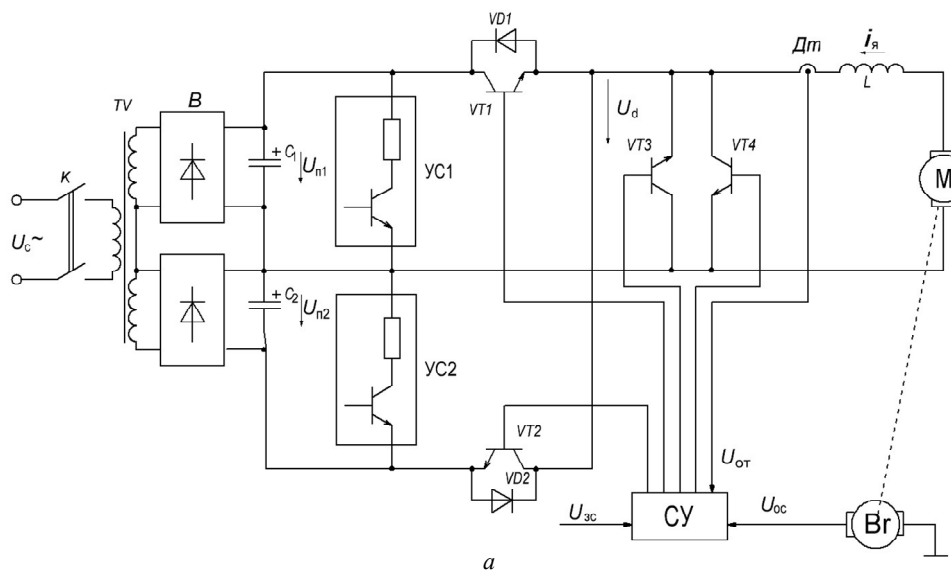
Вторая функциональная схема реверсивной полумостовой схемы с нулевыми вентилями *DC-DC*-преобразователя представлена на рис. 4, *a*. Реверсивная схема образована встречно-параллельным включением по выходу двух комплектов нереверсивных ВП *VT1*, *VT3* и *VT2*, *VT4*, выполненных по простейшей схеме и отличающихся от схемы рис. 1, *a* использованием вместо нулевых вентилях транзисторов *VT3* и *VT4* [2]. Нулевые вентили снижают пульсации тока якоря двигателя в отличие от предшествующей схемы, приведенной на рис. 3. Диоды *VD1* и *VD2* защищают от перенапряжений транзисторов *VT1* и *VT2* при выключениях транзисторов *VT3* и *VT4*.

Здесь возможно совместное и раздельное управление комплектами ВП. Временные диаграммы работы преобразователя при раздельном управлении комплектами в режимах непрерывного и прерывистого токов аналогичны рис. 1, *б*, *в*. В режиме прерывистого тока якоря регулировочные и электромеханические характеристики системы «ВП–ДПТ» становятся нелинейными.

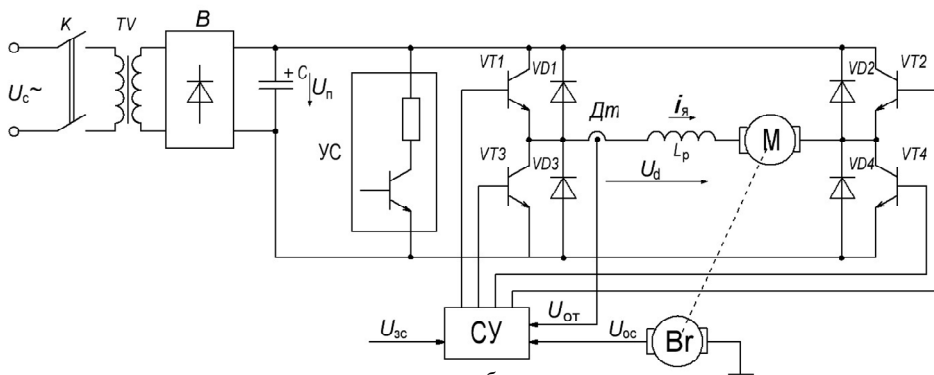
При совместном управлении комплектами ВП в цепи якоря двигателя формируется переменный ток, исключается интервал бестоковой паузы и обеспечивается линейность статических характеристик системы «ВП–ДПТ».

Управляемый нулевой вентиль, реализованный на транзисторах *VT3* и *VT4*, позволяет форсировать процесс спада тока якоря до нуля. Так, при включенном транзисторе *VT3* или *VT4* ток якоря двигателя в цепи спадает медленно, а при выключенных транзисторах *VT3* (*VT4*) ток якоря быстро спадает через открытые диоды *VD1* или

VD2 под действием источников питания $U_{п1}$ или $U_{п2}$. Это повышает быстродействие электропривода по сравнению со схемой, приведенной на рис. 1, а.



а



б

Рис. 4

Реверсивная схема транзисторного электропривода постоянного тока с одним источником постоянного напряжения на основе мостовой схемы ИППН приведена на рис. 4, б. Реверсивная схема ВП, изменяющая не только направление тока, но и полярность напряжения якоря электродвигателя, позволяет обеспечить генераторное торможение машины и реверс скорости. Мостовая схема импульсного преобразователя постоянного напряжения (рис. 4, б) состоит из двух стоек. Первая стойка образована схемой, последовательно соединенных транзисторов VT1 и VT3 по отношению к источнику питания, а вторая – транзисторами VT2 и VT4. В диагональ моста, образованного транзисторными ключами, включен электродвигатель постоянного тока. Питание ВП осуществляется от источника постоянного напряжения $U_{п}$, шунтированного конденсатором C и узлом сброса УС.

Существует множество методов коммутации транзисторов мостовой схемы, представляющие собой как дальнейшее развитие вышеописанных методов коммутации, так и новых. Некоторые из них обеспечивают как совместное, так и раздельное управление комплектами клапанов, образующих две нереверсивные схемы со

встречно-параллельным включением по выходу. Мостовая схема обеспечивает генераторное торможение машины и увеличивает быстродействие привода.

Для обеспечения линейных статических характеристик системы ВП–ДПТ нужно так коммутировать транзисторы мостовой схемы, чтобы в якоре двигателя протекал переменный ток. Всякое отступление от этого условия приводит к появлению нелинейности статических характеристик системы ВП–ДПТ.

При формировании ВП на выходе однополярных прямоугольных импульсов напряжения уменьшаются пульсации тока якоря, дополнительные потери мощности, повышается надежность вентиляционного преобразователя и привода в целом. Поэтому мостовая схема вентиляционного преобразователя, несмотря на большое число элементов силовой части, находит широкое применение в реверсивных электроприводах постоянного тока.

Литература

1. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. Л.: Энергия, 1973.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.

ОХОТКИН ГРИГОРИЙ ПЕТРОВИЧ – доктор технических наук, профессор, декан факультета радиотехники и электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elius@list.ru).

OKHOTKIN GRIGORY PETROVICH – doctor of technical sciences, professor, dean of Radio Engineering and Electronics Faculty, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

РОМАНОВА ЕВГЕНИЯ СЕРГЕЕВНА – магистрант кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (oborotnya@gmail.com).

ROMANOVA EVGENIA SERGEEVNA – master's program student of Industrial Electronics Chair, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

УДК 62-83: 621.314.632
ББК 31.291

Г.П. ОХОТКИН, Е.С. РОМАНОВА

АНАЛИЗ ЗАКОНОВ КОММУТАЦИИ КЛЮЧЕЙ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Ключевые слова: импульсный преобразователь постоянного напряжения, мостовая схема импульсного преобразователя, законы коммутации ключей.

Дан анализ законов коммутации ключей импульсных преобразователей. Установлено, что наиболее эффективной является поочередная несимметричная коммутация транзисторов. Для предотвращения сквозных токов в силовой схеме предложено формировать неперекрывающиеся импульсы управления ключами.

G.P. OKHOTKIN, E.S. ROMANOVA ANALYSIS OF KEY SWITCHING LAWS FOR BRIDGE CIRCUIT OF PULSE CONVERTER

Key words: pulse converter of DC voltage, the bridge circuit of pulse converter, the laws of switching keys.

The laws analysis of keys switching of pulse converters is given. It is established, that the most effective is serial asymmetrical switching of transistors. To prevent cross-cutting currents in the power scheme, it is offered to form some not blocked impulses of keys control.

При построении высококачественного реверсивного электропривода постоянного тока находит широкое применение мостовая схема импульсного преобразователя (рис. 1, а). Мостовая схема, выполненная на четырех транзисторах с обратными диодами, позволяет создавать реверсивный (четырёхквadrантный) импульсный преобразователь постоянного напряжения (ИППН) с высокой частотой и разнообразными законами коммутации силовой цепи, обладающий высокими энергетическими показателями, хороши-