

**СИСТЕМА УПРАВЛЯЕМЫЙ ДИСКРЕТНЫЙ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ — ДВИГАТЕЛЬ С УЛУЧШЕННЫМ  
КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ**

А. И. ЗАЙЦЕВ, В. Н. МИШИН, А. А. КУВШИНОВ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры ЭПП  
электромеханического факультета)

Системы управляемый дискретный преобразователь — двигатель (УДП-Д) широко применяются в различных областях техники для регулирования скорости вращения приводов с двигателями постоянного тока. Благодаря появлению кремниевых управляемых вентилях, обладающих высоким коэффициентом полезного действия и большим сроком службы, системы УДП-Д получают еще большее распространение, так как повысится надежность приводов, и улучшатся их технико-экономические показатели.

Одним из основных требований практики к современному электроприводу является создание быстродействующих, достаточно простых в монтаже и эксплуатации приводов. Это нашло свое отражение в разработке весьма простых релейных систем УДП-Д, в которых отсутствуют сложные фазосмещающие, усиливающие, корректирующие цепи. Однако эти системы обладают рядом существенных недостатков:

- 1) наличие в сети питания и в двигателе пульсирующих токов, что приводит к снижению коэффициента полезного действия;
- 2) небольшой диапазон регулирования скорости;
- 3) резкое снижение допустимой нагрузки двигателя с увеличением диапазона регулирования.

Появляющиеся в настоящее время системы УДП-Д с кремниевыми управляемыми вентилями [1] по принципу построения аналогичны системам с ионными вентилями, в которых скорость двигателя регулируется с помощью изменения угла зажигания вентилях. Однако наличие кремниевых управляемых вентилях с малым временем деионизации открывает широкие перспективы для создания различных систем УДП-Д с искусственной коммутацией, которые рассматриваются в данной работе.

Импульсные и релейные системы УДП-Д с искусственной коммутацией, обладая высоким быстродействием и достаточной простотой, свободны от приведенных недостатков релейных схем, имеют высокий коэффициент полезного действия и большой диапазон регулирования скорости. Кроме того, они позволяют вентилям работать с опережающим углом зажигания, что улучшает коэффициент мощности привода.

Как известно, для восстановления управляемости дискретного вентиля требуется снизить ток через него до нуля. Эту роль в предлагае-

мых ниже системах выполняет узел искусственной коммутации (рис. 1 и рис. 2), который работает следующим образом.

Для гашения силового вентиля  $V_1$  используется разряд конденсатора  $C$  на нагрузку через вентиль искусственной коммутации  $V_2$ . Конденсатор  $C$  предварительно заряжается до напряжения большего, чем анодное напряжение вентиля  $V_1$ . Если нагрузка носит активно-индуктивный характер, то она шунтируется вентилем  $V_{ш}$ , через который в пе-

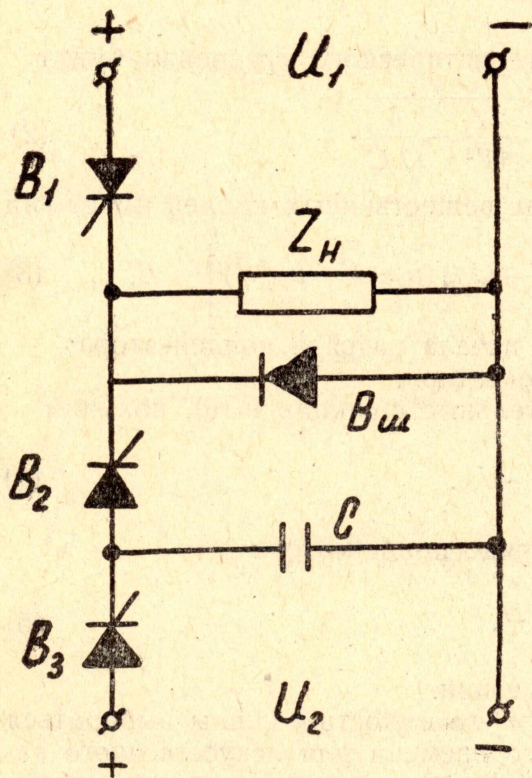


Рис. 1.

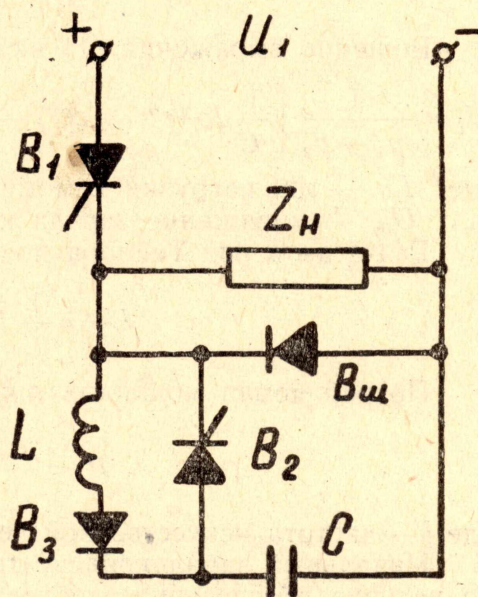


Рис. 2.

риод паузы разряжается энергия, накопленная в магнитном поле. При соответствующей частоте коммутации силового вентиля ток в нагрузке будет непрерывным.

Энергия для предварительного заряда коммутирующего конденсатора может быть взята от дополнительного источника постоянного тока малой мощности  $U_2$  (рис. 1), или используется резонансный заряд через индуктивность (рис. 2) от сети, питающей нагрузку. Катушка индуктивности должна обладать высокой добротностью и иметь величину от нескольких десятков до сотен микрогенри, то есть быть достаточно малой в целях быстрого заряда конденсатора. При работе системы (рис. 2) от сети переменного тока вместо неуправляемого зарядного диода  $V_3$  используется управляемый, так как в этом случае заряд конденсатора следует осуществлять непосредственно перед гашением вентилей силовой цепи.

При проектировании систем с искусственной коммутацией задача сводится к выбору величины коммутирующей емкости в зависимости от нагрузки, напряжения и мощности дополнительного источника, если используется схема рис. 1.

Будем считать, что при искусственной коммутации ток главных вентилях мгновенно спадает до нуля, то есть влияние анодной индуктивности цепи питания не учитывается, параметры цепи разряда конденсатора постоянны, падение напряжения в дуге вентилях отсутствует.

При этом дифференциальное уравнение, описывающее процесс разряда, будет иметь вид:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{1}{T} \frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{LC} U_c = -\frac{E}{LC}, \quad (1)$$

где  $U_c$  — напряжение на конденсаторе;  
 $T$  — электромагнитная постоянная цепи нагрузки;  
 $L$  — индуктивность нагрузки;  
 $E$  — противо-э. д. с. двигателя.

Корни соответствующего характеристического уравнения будут

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T} \pm \sqrt{\frac{1}{4T^2} - \frac{1}{LC}}. \quad (2)$$

Решение выражения (1) в случае вещественных корней имеет вид

$$U_c = \frac{1}{p_1 - p_2} \left[ \frac{1}{C} I_{я0} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) - (E - U_{c0}) (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \right] - E, \quad (3)$$

где  $I_{я0}$  — ток нагрузки к моменту начала разряда конденсатора;  
 $U_{c0}$  — напряжение заряда конденсатора.

Разлагая в ряд Тейлора показательные функции в (3), получим

$$U_c = \frac{1}{C} I_{я0} t - U_{c0}. \quad (4)$$

Потребляемая мощность при заряде конденсатора

$$P_c = \frac{U_{c0}^2 C}{2} \cdot f, \quad (5)$$

где  $f$  — частота искусственной коммутации.

Начальный заряд конденсатора и его емкость должны выбираться из условия обеспечения необходимого времени для искусственного за-  
 пираия вентиля, выходящего из работы. В то же время мощность гас-  
 ящей цепи должна быть минимальной, чтобы расширить диапазон  
 регулирования скорости и увеличить к.п.д. системы за счет снижения  
 потерь при двойном преобразовании энергии, поступающей из цепи  
 искусственной коммутации.

Исследовав выражение (5) с учетом (4) на минимум, получим  
 условия оптимального выбора параметров цепи искусственной ком-  
 мутации

$$C = \frac{I_{я0} \cdot t_{\delta}}{U}; \quad (6)$$

$$U_{c0} = 2 \cdot U, \quad (7)$$

где  $t_{\delta}$  — время восстановления управляемости вентилях, выходящих  
 из работы;

$U$  — напряжение питания нагрузки к моменту восстановления  
 управляемости силового вентиля.

При работе на двигатель емкость коммутирующей цепи должна  
 выбираться из условия допустимой перегрузки по току

$$C \geq \frac{I_H \cdot \lambda_I \cdot t_{\delta}}{U}, \quad (8)$$

где  $\lambda_I$  — коэффициент допустимой перегрузки двигателя по току;  
 $I_H$  — номинальный ток двигателя.

При использовании узла искусственной коммутации с резонансным зарядом конденсатора (рис. 2) начальное напряжение на конденсаторе оказывается известным, в этом случае величина емкости найдется из (4) как

$$C \geq \frac{I_n \cdot \lambda_1 \cdot t_{\delta}}{U(\gamma - 1)}, \quad (9)$$

где  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий превышение напряжения заряда конденсатора над напряжением питания и зависящий от параметров зарядной цепи. При добротности зарядного контура, равной 10, что легко осуществимо,  $\gamma = 1,7 \div 1,8$ .

В случае комплексных корней решение выражения (1) запишется в виде

$$U_c = e^{-\frac{t}{2T}} \left[ (E - U_{c0}) \cos \beta t + \frac{1}{\beta} \left( \frac{I_{я0}}{C} + \frac{E}{2T} - \frac{U_{c0}}{2T} \right) \sin \beta t \right] - E, \quad (10)$$

где  $\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4T^2}}$  — коэффициент при мнимой части корней характеристического уравнения.

Полученное выражение (10) является трансцендентным и разрешимо лишь численно-графическими методами.

Достоинством вышеприведенных схем искусственной коммутации является их универсальность, так как они применимы при питании нагрузки как от сети постоянного тока, так и от сети переменного тока, причем в последнем случае не зависят от схемы выпрямления. Следует отметить, что энергия коммутирующего конденсатора полностью отдается в нагрузку, претерпев лишь двукратное преобразование.

На базе рассмотренных схем искусственной коммутации могут быть созданы системы УДП-Д с различным способом регулирования скорости вращения привода. Ниже приводится непрерывная система УДП-Д с улучшенным  $\cos \phi$  (рис. 3) с преобразователями, соединенными по схеме трехфазная звезда с нулевым выводом.

На возможность создания вентильных схем для генерации опережающей емкостной энергии, указывал Г. И. Бабат [2], ряд схем был разработан И. Л. Кагановым [3], И. М. Чиженко и др. Идея схемы рис. 3 заключается в том, что при уменьшении среднего выпрямленного напряжения угол зажигания очередного вентиля берется не отстающий, как в обычных схемах, а опережающий. Для этого предварительно искусственно выключается вентиль, выходящий из работы, а затем включается очередной. При этом основная гармоническая анодного тока оказывается сдвинутой по отношению к напряжению на некоторый опережающий угол.

Схема управления системы УДП-Д с улучшенным  $\cos \phi$  состоит (рис. 3) из узла синхронизации, схемы широтноимпульсного модулятора ШИМ, устройства для включения силовых вентилях и схемы искусственной коммутации. В системе предусмотрена отрицательная обратная связь по скорости и токовая отсечка. Временная диаграмма, поясняющая работу и назначение отдельных элементов системы, представлена на рис. 4.

Узел синхронизации используется для синхронизации схемы управления от сети переменного тока и включает в себя трехфазный мало-мощный трансформатор  $Tr$ , соединенный по схеме  $\Delta/\Delta$  — 11, вентили  $B_1 - B_6$ , быстронасыщающиеся трансформаторы БНТ<sub>1</sub> — БНТ<sub>6</sub> и триггеры  $T_1 - T_3$ .

Каждый из триггеров управляется с помощью соответствующих БНТ, импульсы с которых снимаются в моменты естественной коммутации вентилях  $B_1—B_6$ . Благодаря сдвигу фаз вторичного напряжения  $U_2$  трансформатора Тр по отношению к первичному (рис. 4), триг-

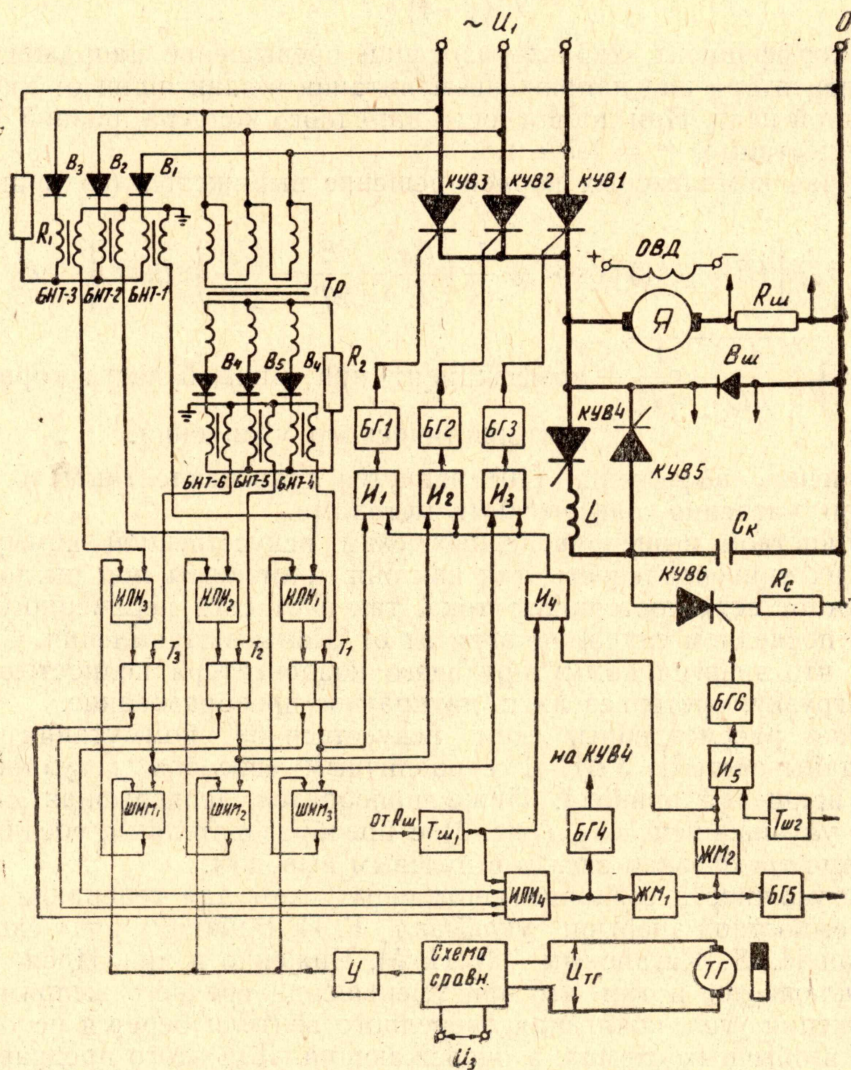


Рис. 3.

геры переключаются из одного устойчивого состояния в другое в моменты времени, соответствующие началу положительных полуволн анодного напряжения  $U_1$ , и возвращаются в исходное состояние импульсами от ШИМ, а при их отсутствии сигналами от БНТ $_1—$ БНТ $_3$ , приходящими через 150 эл. градусов после импульсов БНТ $_4—$ БНТ $_6$ . Таким образом, с изменением выдержки времени соответствующих ШИМ триггеры будут находиться в возбужденном состоянии в течение промежутка времени между 0 и 150 эл. градусами положительных полуволн анодного напряжения  $U_1$ . Так как от триггеров Т $_1—$ Т $_3$  синхронизируется запуск силовых и коммутирующего вентилях, то с изменением выдержки времени ШИМ будет изменяться продолжительность горения соответствующих силовых вентилях КУВ $_1—$ КУВ $_3$  от 0 до 120 эл. градусов, при этом угол зажигания будет изменяться от 0 до 30 эл. градусов, оставаясь все время опережающим.

Широтно-импульсные модуляторы ШИМ, задающие продолжительность горения главных вентиляй, выполнены на основе ждущего мультивибратора с отдельными коллекторными напряжениями транзисторов. Длительность импульсов, вырабатываемых ШИМ, зависит от алгебраической суммы задающего напряжения и напряжения тахогенератора ТГ, с помощью которого в системе осуществляется отрицательная обратная связь по скорости.

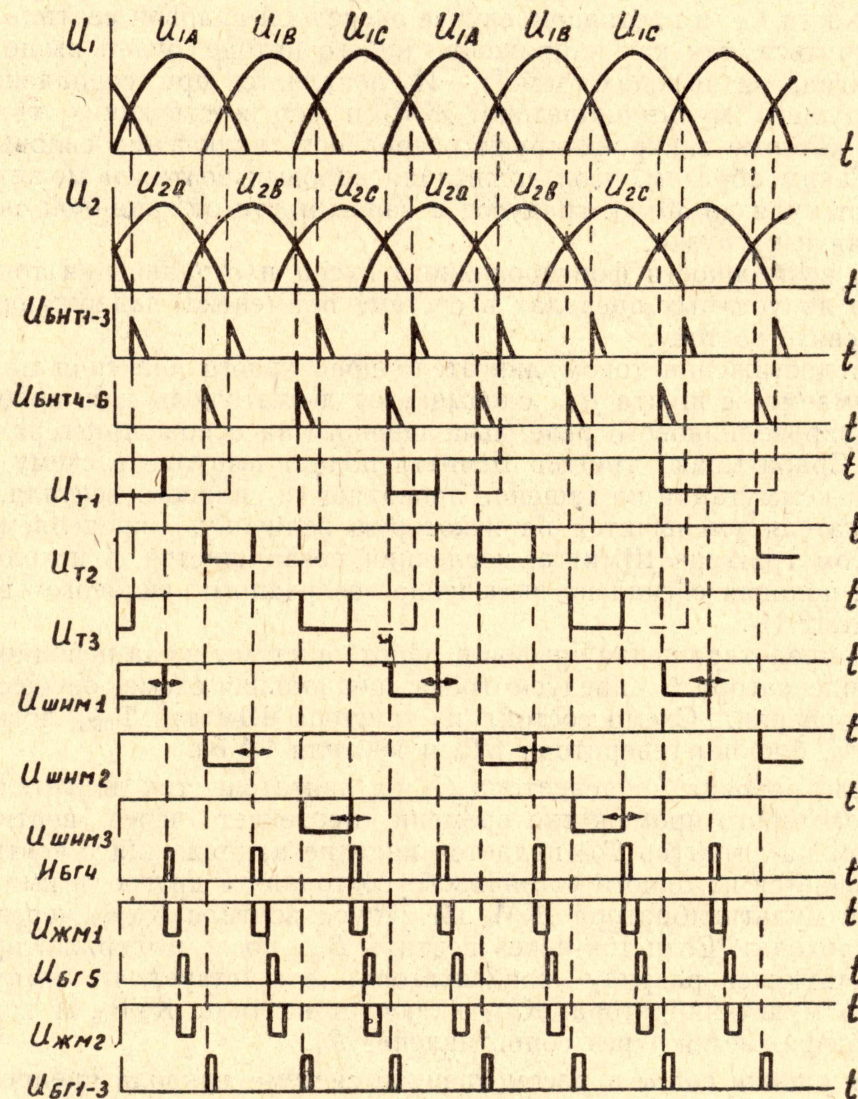


Рис. 4.

Для включения кремниевых управляемых вентиляй используются блокинг-генераторы БГ<sub>1</sub> — БГ<sub>6</sub>, импульсы на запуск которых поступают из узла синхронизации через логические схемы И и ИЛИ.

При возвращении триггеров Т<sub>1</sub> — Т<sub>3</sub> в исходное состояние с приходом сигналов от ШИМ или БНТ<sub>1</sub>—БНТ<sub>3</sub> через логическую схему ИЛИ происходит запуск блокинг-генератора БГ<sub>4</sub>, управляющего зарядным вентилем КУВ<sub>4</sub>, через который резонансно заряжается емкость  $C_k$ . Одновременно сигнал из схемы ИЛИ поступает на ждущий мультивибратор ЖМ<sub>1</sub>, который через выдержку времени, достаточную для заряда емкости и восстановления управляемости вентиля КУВ<sub>4</sub>, включает

вентиль искусственной коммутации КУВ<sub>5</sub>. Емкость С<sub>к</sub>, разряжаясь через КУВ<sub>5</sub> на двигатель, запирает проводящий ток силовой вентиль.

Синхронизация включения силовых вентилях КУВ<sub>1</sub> — КУВ<sub>3</sub> производится с помощью логических схем И<sub>1</sub> — И<sub>3</sub>, на один из входов которых поступают сигналы от триггеров Т<sub>1</sub> — Т<sub>3</sub>, а на другой — от ждущего мультивибратора ЖМ<sub>2</sub> через логическую схему И<sub>4</sub>. Ждущий мультивибратор ЖМ<sub>2</sub> запускается одновременно с вентиляем искусственной коммутации КУВ<sub>5</sub> и служит для создания задержки на время разряда емкости С<sub>к</sub> в противном случае очередной силовой вентиль может не включиться, так как напряжение на его катоде будет выше анодного. Сигнал на выходах схем И<sub>1</sub> — И<sub>3</sub> появляется при совпадении сигнала ждущего мультивибратора ЖМ<sub>2</sub> и соответствующих триггеров Т<sub>1</sub> — Т<sub>3</sub>, которые синхронизируют очередность включения силовых вентилях. Таким образом, угол зажигания силовых вентилях может изменяться от нуля до 30 эл. градусов в зависимости от заданной скорости двигателя и нагрузки.

Для возможности форсированного пуска и ограничения тока двигателя в допустимых пределах в системе применена задержанная обратная связь по току.

При достижении током двигателя предельного значения напряжение, снимаемое с шунта R<sub>ш</sub>, оказывается достаточным для срабатывания полупроводникового реле, выполненного на основе триггера Шмитта Т<sub>ш1</sub>. Срабатывая, триггер Шмитта подает импульс в схему искусственной коммутации на гашение проводящего силового вентиля. Когда ток двигателя уменьшится на некоторую величину, определяемую гистерезисом триггера Шмитта, последний возвращается в исходное состояние, подавая сигнал на включение очередного силового вентиля через схему И<sub>4</sub>.

Для предотвращения срывов в работе системы из-за неполного разряда конденсатора С предусмотрена специальная схема, осуществляющая его разряд. Схема состоит из триггера Шмитта Т<sub>ш2</sub>, логической схемы И<sub>5</sub>, блокинг-генератора БГ<sub>6</sub> и вентиля КУВ<sub>6</sub>.

После разряда конденсатора С<sub>к</sub> на двигатель ток двигателя в течение некоторого промежутка времени протекает через вентиль В<sub>ш</sub>. При этом на триггер Т<sub>ш2</sub> подается падение напряжения с вентиля, он переключается из одного устойчивого состояния в другое, и импульс от ждущего мультивибратора ЖМ<sub>2</sub> на запуск вентиля КУВ<sub>6</sub> через схему И<sub>5</sub> не проходит. Если ток через вентиль В<sub>ш</sub> после выдержки времени, соответствующей разряду конденсатора, отсутствует, то импульс от ждущего мультивибратора ЖМ<sub>2</sub> включает вентиль КУВ<sub>6</sub>, и конденсатор С разряжается через сопротивление R<sub>с</sub>.

Для оценки cos φ в рассмотренной системе привода предположим, что индуктивность нагрузки бесконечно большая, то есть через двигатель протекает идеально сглаженный ток, и пренебрежем влиянием анодной индуктивности на процесс коммутации. В этом случае анодный ток будет иметь вид прямоугольных импульсов. После разложения кривой анодного тока в ряд Фурье получим

$$I = \frac{\lambda}{2\pi} I_d + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=\infty} \frac{2}{\kappa\pi} I_d \sin \kappa \frac{\lambda}{2} \sin \left[ \kappa\vartheta + \frac{\pi}{2} - \kappa \left( \vartheta_3 + \frac{\lambda}{2} \right) \right], \quad (11)$$

где  $\lambda$  — продолжительность горения главных вентилях;  
 $I_d$  — ток нагрузки;  
 $\vartheta_3$  — угол зажигания вентилях.

Первая гармоническая анодного тока

$$I_{1(1)} = \frac{\sqrt{2}I_d}{\pi} \cdot \sin \frac{\lambda}{2}, \quad (12)$$

угол сдвига первой гармонической тока

$$\varphi_{1(1)} = \frac{\pi}{2} - \left( \vartheta_3 + \frac{\lambda}{2} \right). \quad (13)$$

Емкостная реактивная мощность, генерируемая системой,

$$Q = 3U_1 \cdot I_{1(1)} \cdot \sin \varphi_{1(1)} = \frac{3}{\sqrt{2}\pi} U_1 I_d [-\sin \vartheta_3 + \sin (\vartheta_3 + \lambda)], \quad (14)$$

где  $U_1$  — действующее значение напряжения питания.

Оценим эффективность использования конденсаторов в схеме с искусственной коммутацией для создания опережающего коэффициента сдвига по сравнению с их включением в сеть переменного тока.

Установленная мощность конденсаторов с учетом выражения (8)

$$Q_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_1^2 \cdot C = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot U_1 \cdot I_n \cdot \lambda_I \cdot t_\delta, \quad (15)$$

где  $f$  — частота сети переменного тока.

Коэффициент использования конденсаторов

$$K_c = \frac{Q}{Q_c} = \frac{1,5}{\pi^2 f} \cdot \frac{I_d}{I_n \lambda_I t_\delta} [-\sin \vartheta_3 + \sin (\vartheta_3 + \lambda)]. \quad (16)$$

Если  $I_d = I_n$ ,  $\lambda_I = 2,5$ ,  $t_\delta = 20$  мксек,  $\vartheta_3 = 0$ ,  $\lambda = \frac{2\pi}{3}$ , то коэффициент использования при принятых допущениях равен  $K_c = 52,7$ . То есть для получения аналогичного опережающего коэффициента сдвига потребовалось бы включить в сеть переменного тока емкость, превосходящую почти в 50 раз емкость цепи искусственной коммутации.

Проведенные экспериментальные исследования рассмотренных схем с искусственной коммутацией показали хорошую их работоспособность. Изложенные принципы могут быть положены в основу создания подобных систем как с кремниевыми управляемыми вентилями, так и ионными вентилями.

Системы УДП-Д с кремниевыми управляемыми вентилями с применением искусственной коммутации полностью используют такую отличительную черту полупроводниковых вентиляей, как быстродействие. Разработанные системы позволяют создать быстродействующие, достаточно простые приводы с высокими технико-экономическими показателями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Вешеневский, Б. С. Замаараев, Я. Ю. Солодухо. Силовые кремниевые управляемые вентили и их применение в электроприводе. ГОСИНТИ, 1963.
2. Г. И. Бабат, Я. А. Кацман. Тиратронные преобразователи с улучшенным коэффициентом мощности и тиратронные компенсаторы. Электричество, № 4, 1937.
3. И. Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи. ч. III, ГЭИ, 1956.