

6
Суд. А-43

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Томский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт имени С.М.Кирова

Научно-исследовательский институт автоматики
и электромеханики.

На правах рукописи

Б.Е. ТРОФИМЕНКО

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
КОММУТАТОРОВ В СХЕМАХ ЭЛЕКТРОМАШИНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.

(Специальность 230 - Электрические машины)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Томск - 1969

Быстрое развитие энергетики народного хозяйства подчинено задаче полной электрификации промышленности, транспорта и сельского хозяйства, являющейся основой создания материально-технической базы коммунизма.

Совершенствование технологических процессов производства очень часто требует применения электропривода с широким диапазоном регулирования скорости вращения, с хорошими статическими и динамическими характеристиками.

В настоящее время преимущественное распространение получили широко-регулируемые электроприводы постоянного тока, несмотря на то, что машина постоянного тока более сложна по конструкции, менее надёжна и экономична, чем машина переменного тока.

Ещё в 1925 г. М.П. Костенко было показано, что асинхронный короткозамкнутый двигатель при питании напряжением переменной частоты обладает такими же регулировочными характеристиками, как и двигатель постоянного тока, однако его регулировочные свойства обеспечиваются не двигателем как таковым, а системой электропривода, содержащей в качестве основного элемента источник регулируемой частоты.

Применяемые в настоящее время источники регулируемой частоты не обеспечивают всех требований, предъявляемых к ним системой электропривода, поэтому работы в направлении создания таких источников весьма актуальны. Среди разрабатываемых перспективными являются машинно-вентильные усилители и преобразователи, использующие положительные свойства электромашинных и статических преобразователей. неотъемлемой частью любой машинно-вентильной системы является полупроводниковый коммутатор.

Учитывая недостаточное исследование конкретных схем управляемых полупроводниковых коммутаторов (УПК) с электрическими машинами, в реферируемой работе поставлены задачи теоретического и экспериментального исследования управляемых полупроводниковых коммутаторов в схемах электромашинного усиления и преобразования, а также разработки электромашинного усилителя регулируемой частоты.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов по главам, заключения и приложения.

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА

Академии наук Кыргызской ССР

В главе первой выполнен обзор электрических машин с различными типами коллекторов /коммутаторов/, а также существующих типов преобразователей и усилителей переменного тока с целью оценки перспективности последних для применения в промышленности в качестве источника регулируемой частоты.

Электрические машины обладают тремя типами коммутаторов: механическими, ионными и полупроводниковыми.

Несовершенство и низкая надёжность механической системы коммутации, наличие скользящего контакта, зависящего от окружающей среды и требующего постоянного ухода, отсутствие быстрого действия и гибкости регулирования и т.д. стимулировали исследования в области создания электрических машин с бесконтактной коммутацией.

Ионно-машинные системы не получили широкого распространения из-за ограниченных технических возможностей ионных приборов /недостаточная надёжность, малый к.п.д., громоздкость и сложность аппаратуры/.

Освоение полупроводниковых приборов / транзисторов, диодов, тиристоров и др./ далось новые возможности в развитии всей электроэнергетики, в частности, и машинно-вентильных систем.

Управляемый полупроводниковый коммутатор, исключая недостатки электрических машин со скользящим контактом, ставит вопрос о дальнейшем развитии и исследовании электрических машин с УПК, класс которых практически шире и многообразнее, чем коллекторных машин.

В настоящее время известно несколько типов электрических машин с полупроводниковыми коммутаторами: синхронные генераторы с выпрямителем в качестве источников постоянного тока или возбуждателей синхронных генераторов и машин специального назначения /бесколлекторные ЭМУ, бесконтактные синхронные двигатели и др./, бесконтактные двигатели постоянного тока, шаговые двигатели, электромашинные усилители и преобразователи на базе синхронно-асинхронных машин.

Обзор и анализ преобразователей частоты для асинхронного электропривода показал, что электромашинные коллекторные преобразователи регулируемой частоты обладают хорошими внешними и регулировочными характеристиками, наличие же механического коллектора и громоздкость этих систем являются их основными недостатками. Синхронные и асинхронные преобразователи не имеют ско-

льзящего контакта, однако они сложны, громоздки, обладают низким быстродействием. Указанные недостатки определили неперспективность электромашинных преобразователей.

Весьма перспективными являются статические преобразователи, в частности тиристорные и транзисторные, обладающие рядом таких достоинств, как высокий к.п.д., высокое быстродействие, малый вес и габариты и др. Тем не менее, недостатки, присущие данным преобразователям /низкий коэффициент мощности, наличие высших гармонических в кривой выходного напряжения, малая перегрузочная способность, сложная и дорогая схема преобразователя в целом и др./, сдерживают до настоящего времени широкое внедрение их в промышленность.

В результате анализа электромашино-вентильных усилителей и преобразователей показана их перспективность, особенно там, где преобразуемую мощность необходимо снимать с вала, вращающегося с переменной или постоянной скоростью /вал электрической машины, турбины, двигателя внутреннего сгорания и т.д./

Учитывая изложенное, в работе поставлены задачи:

1. Разработать и исследовать различные варианты УПК с обмотками для получения вращающихся в электрических машинах магнитных полей.
2. Разработать и исследовать электромашинный усилитель регулируемой частоты с управляемым полупроводниковым коммутатором.
3. Провести экспериментальные исследования на опытных машинно-вентильных образцах.

Вторая глава посвящена разработке и теоретическому исследованию схемы коммутатора на тиристорах при работе его на замкнутую обмотку якорного типа.

На основе анализа использования обмоток, а также простоты схемы УПК выбирается тип обмоток для электромашинных преобразователей и усилителей. Показано, что для цели создания вращающихся магнитных полей в электрической машине представляется целесообразным применение замкнутых и разрезных /с нулевым проводом и однополупериодным питанием/ обмоток.

Замкнутая обмотка при хорошем использовании меди может быть изготовлена с тиристорным УПК. Тиристорный УПК может обеспечить сравнительно большие мощности и имеет простую схему управления.

Разрезная обмотка, обладая несколько худшим коэффициентом использования меди, имеет весьма простую схему УПК. Коэффициент

же использования меди может быть значительно повышен на основании того, что при однополупериодном питании обмотки возможно увеличение плотности тока фаз обмотки, не нарушая при этом теплового режима машины.

На рис. 1 приведена электрическая схема коммутатора с обмоткой. Вращение оси магнитного потока достигается последовательным перемещением точек подключения обмотки к источнику постоянного тока U_y . Последнее достигается включением и выключением тиристоров, соединённых с диаметрально расположенными выводами обмотки /при $2p=2$ / и разнополярными шинами источника U_y .

На основании физической картины процесса коммутации секций обмотки управления процесс коммутации разбит на два этапа, приведены для них эквивалентные схемы замещения.

Первый этап коммутации ($t_0 - t_1$) определяется временем разряда коммутирующих конденсаторов на обмотку управления /О.У./, второй этап ($t_1 - t_2$) временем установления тока обратного направления в коммутируемых секциях и заряда конденсаторов.

Ток в О.У. первого этапа изменяется по закону

$$i_y = A \sin \omega_y \cdot t + I_{0y} \cdot \cos \omega_y \cdot t, \quad |1|$$

$$\text{где } \omega_y = \sqrt{\frac{2}{L_y C} - \alpha_y^2}, \quad \alpha_y = \frac{r_y}{2L_y}, \quad A = \frac{U_y + 4U_c \max}{2L_y \cdot \omega_y}$$

U_y - источник управления,

I_{0y} - предкоммутационный ток О.У.,

L_y, r_y - параметры обмотки управления,

$U_c \max$ - напряжение на коммутирующем конденсаторе.

Время первого этапа определяется:

$$t_1 = \frac{1}{\omega_y} \arcsin \frac{\alpha_y \cdot \omega_y \cdot (B^2 - A^2) + A \cdot B \cdot (\omega_y^2 - \alpha_y^2)}{(\alpha_y^2 + \omega_y^2) \cdot (A^2 + B^2)}, \quad |2|$$

где $B = I_{0y}$.

t_1 - это время в течение которого происходит восстановление запирающих свойств тиристора, поэтому условием нормальной работы УПК при любых режимах будет выражение:

$$t_1 \geq t_{\beta}, \quad |3|$$

где t_{β} - время восстановления запирающих свойств тиристоров УПК. Во втором этапе коммутации ток секции изменяется по закону

$$i_s = 1/2 I_{1y} \cdot (2 \cdot e^{-\alpha_s \cdot t} \cos \omega_s \cdot t - 1), \quad |4|$$

где I_{1y} - ток в конце первого - начале второго этапов коммутации,

$$\alpha_s = \frac{r_s}{2L_s}, \quad \omega_s = \sqrt{\frac{1}{L_s C} - \alpha_s^2},$$

L_s, r_s - параметры секции О.У.

К концу второго этапа ($t_1 - t_2$) ток О.У. равен

$$I_{2y} = I_{1y} - 2 \cdot \left(\frac{L_s}{L_0} I_{1y} - \frac{\pi \cdot U_y}{2\omega_s \cdot L_0} \right). \quad |5|$$

Длительность второго этапа коммутации равна

$$t_2 = \frac{\pi}{2\omega_s}, \quad |6|$$

где L_0 - индуктивность параллельной ветви обмотки без одной коммутируемой секции.

По окончании второго этапа ток в О.У. устанавливается до предкоммутационной величины по закону

$$I_{0y} = I_{2y} + \left(\frac{U_y}{r_y} - I_{2y} \right) \cdot (1 - e^{-\frac{t_2}{T_r}}), \quad |7|$$

где $T_r = L_y / r_y$, $t_3 = 1/f_{пер} - (t_1 + t_2)$.

В следующем цикле процесс повторяется.

Угловая скорость вращения магнитного потока управления, при K - отводах от О.У. и $f_{пер}$ - частоте переключения точек обмотки равна

$$\omega_y = \frac{2\pi \cdot f_{пер}}{K} \quad |8|$$

Максимально возможная скорость вращения магнитного поля управления определяется длительностью полного времени коммутации:

$$\omega_{y \max} = \frac{2\pi}{K \cdot (t_1 + t_2)} \quad |9|$$

Определена нижняя частота переключения ячеек УПК, при котором возможно нормальное его включение. Из условия устойчивого

запуска коммутатора $t_1 \geq t_s$ получено

$$f_{пер. вкл} > \frac{1}{U_y \cdot C_n \frac{S}{S - (K+e) \cdot Z_y}} \quad |10|$$

где $S = 2K L_y W_y \cdot \sin W_y \cdot t_s$.

На основе выражений /1,5,7/ для тока в коммутационные интервалы времени получена зависимость тока в О.У. в функции частоты переключения при $U_y = const$. Показано, что ток обмотки управления содержит постоянную и переменную составляющие и уменьшается с увеличением $f_{пер}$:

$$\bar{I}_y = \frac{U_y}{2L_y} \cdot \frac{\rho^{\frac{t_s}{T}} - 1}{\rho^{\frac{t_s}{T}} - \alpha} \left[(1+\alpha) + (1-\alpha) \cdot \sin 2\pi f_{пер} \cdot t \right], \quad |11|$$

$$где \quad \alpha = \left(1 - \frac{2L_s}{L_o} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{2L_s}{L_o}} \sin \frac{\sqrt{2L_s \cdot L_y}}{2L_s + L_y} + \cos \frac{\sqrt{2L_s \cdot L_y}}{2L_s + L_y} \right)$$

Анализ показал, что получение более жесткой характеристики $I_y = f(f_{пер})$ при $U_y = const$ может быть достигнуто уменьшением величины отношения L_s/L_o , что эквивалентно увеличению числа отводов от О.У.

В результате анализа определены максимальные и средние значения токов через тиристоры УПК в зависимости от выбранного числа отводов от О.У.

Надежность работы УПК, а значит и всей машино-вентиляционной системы, зависит прежде всего от режима работы его полупроводниковых элементов, которые, как известно, быстро выходят из строя при превышении их допустимых параметров. Процесс коммутации тока О.У. сопровождается перенапряжениями на отдельных её участках, что соответственно приводит к перенапряжениям на тиристорах и "отсекающих" диодах.

Максимальное напряжение на коммутирующем конденсаторе определяется только величиной тока О.У. /при постоянных параметрах L_s и C /, не зависит от U_y , $f_{пер}$ и определяется

выражением:

$$U_c \max = \bar{I}_y \cdot \sqrt{\frac{L_s}{C}} \quad |12|$$

Максимальное прямое напряжение на тиристоре кольца УПК равно

$$U_T \max = U_c \max \frac{K^2}{4 \cdot (K-1)} \quad |13|$$

Максимальный пик обратного напряжения на диоде в процессе работы

$$U_d \max = \left[\frac{K^2 - 4}{4 \cdot (K-1)} + \frac{2}{\pi} \right] \cdot U_c \max - U_y \quad |14|$$

При известных параметрах обмотки управления и величине необходимого тока управления в задачу проектирования УПК входит выбор количества ячеек, типа полупроводниковых силовых приборов, коммутирующих конденсаторов, а также схемы управления.

Показано, что число отводов от О.У. в конечном итоге определяет практически все режимы элементов коммутатора, его технические и экономические показатели.

Даются рекомендации по выбору числа отводов О.У. из условия обеспечения необходимого диапазона скорости вращения магнитного потока, процентного содержания гармонических составляющих индукции в зазоре машины, созданных О.У., а также простоты схемы УПК.

Указано на возможность увеличения, в разумных пределах, количества отводов с целью снижения установленной мощности силовых элементов УПК /тиристоров и диодов/. Работа элементов УПК при большой надежности позволяет выбирать их с меньшими номинальными данными по току при одинаковой величине амплитуды тока через них. Установленная мощность силовых элементов УПК при увеличении числа отводов снижается не только за счет уменьшения номинального тока, но и допустимого напряжения /12, 13, 14/.

В диссертации приведена разработанная схема управления УПК, которая является неотъемлемой его частью. Схема управления представляет собой разомкнутый одитактовый сдвиговой регистр, собранный на транзисторах и ферритовых сердечниках с прямоугольной петлей гистерезиса.

На основе аналитических выражений рассчитаны и построены кривые токов секции обмотки, кривые максимально возможной частоты переключений, кривые зависимости установившегося тока обмотки управления от частоты переключения. Приведены кривые, показывающие характер изменения напряжения на элементах УПК /конденсаторе, тиристоре, диоде/ и др.

В третьей главе проведено аналитическое исследование предлагаемой схемы /рис.2/ электромашинного усилителя регулируемой частоты /ЭМУ-РЧ/ и схемы транзисторного коммутатора с разрезной обмоткой.

ЭМУ-РЧ состоит из асинхронного генератора /обмоток W_s, W_p /, возбуждаемого от источника постоянного тока через УПК и обмотку возбуждения / W_c /. Ротор асинхронного генератора вращается приводным двигателем / в принципе любым/.

С точки зрения лучшего использования установленной мощности УПК, его простоты, и, соответственно, надежности всего ЭМУ-РЧ выбрана многофазная разрезная обмотка с нулевым проводом и однополупериодным питанием фаз. Разработанная для ЭМУ-РЧ транзисторная схема коммутатора обеспечивает однополупериодное питание фаз О.У. В качестве распределителя использованы триггерные ячейки, в качестве управляемых полупроводниковых ключей - составные триоды. Задающий генератор представляет собой управляемый постоянным напряжением мультивибратор. Промежуточные усилители между ячейками триггеров и составными ключами собраны на транзисторах типа $n-p-n$ с целью получения режима ключа для всей схемы. Схема УПК проста, надежна, обладает высоким к.п.д.

УПК, обеспечивая закономерную последовательность подключения и отключения фаз О.У. к источнику постоянного тока U_y , создает в машине вращающийся магнитный поток возбуждения. Частота выходного напряжения может регулироваться от нескольких герц до максимальной частоты, определяемой

$$f_{\text{вых max}} = P_{\text{ар}} \cdot P_r,$$

где $P_{\text{ар}}$ - число пар полюсов асинхронного генератора,

P_r - скорость вращения ротора.

/15/

Мощность с вала передается в нагрузку и обмотку возбуждения, благодаря чему снижается мощность возбуждения от U_y , что приводит к увеличению коэффициента усиления по каналу напряжения.

Для получения наибольшего коэффициента усиления от асинхронного генератора во всем рабочем диапазоне частот необходимо с ростом скольжения сопротивление ротора увеличивать в широком диапазоне. Это возможно лишь при фазном роторе. Мощность ротора, которая велика при большом значении скольжения, через контактные кольца может подаваться на вход ЭМУ-РЧ через УПК, либо на выход ЭМУ-РЧ через статический

преобразователь.

При поддержании критического скольжения асинхронного генератора в случае малых нагрузок ЭМУ-РЧ возможен режим самовозбуждения. Для обеспечения усилительных свойств генератора в широком диапазоне нагрузки ЭМУ-РЧ снабжается подмагничивающей обмоткой W_l , которая наматывается вокруг спинки статора и включается последовательно в цепь управления.

На основе приведенной схемы возможен бесконтактный вариант ЭМУ-РЧ. В бесконтактном варианте используется дополнительный каскад, состоящий из двух обмоток: на статоре и роторе. Число пар полюсов дополнительного каскада отличается от числа пар полюсов генератора, что позволяет их совместить в одном магнитопроводе. Возможны два режима работы дополнительного каскада.

Если поле роторной обмотки вращается согласно с ротором, дополнительный каскад работает в двигательном режиме. При этом часть энергии скольжения генератора возвращается на вал, а часть поступает на вход, либо выход ЭМУ-РЧ.

Если поле роторной обмотки вращается встречно с ротором, то дополнительный каскад работает в режиме асинхронного преобразователя частоты. Энергия скольжения, усиленная дополнительным каскадом, может быть также использована.

Теоретически исследован контактный вариант ЭМУ-РЧ, обладающий лучшими энергетическими показателями и простой схемой.

Исследование ЭМУ-РЧ проводится для случая шеститактной коммутации фаз О.У. по закону .. 1, 2, 3 - 2, 3, 4 - 3, 4, 5 - 4, 5, 6 ..., т.е. когда в процессе работы коммутируют диаметрально расположенные фазы. Так как ЭМУ-РЧ с УПК является машиной с дискретно изменяющимися параметрами, то рассмотрение любых режимов производится по интервалам времени, равным периоду следования импульсов переключения ячеек УПК $t_u = 1/f_{\text{пер}}$.

На основе общей теории электрических машин, при общепринятых допущениях; а также при условии, что скорость вращения ротора постоянна и угол коммутации фаз О.У. равен нулю, составлены исходные дифференциальные уравнения в интервале времени t_u .

Для получения системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами машина преобразована к эквивалентной с двухфазными обмотками. Для преобразования переменных использованы матрицы преобразования, полученные Ш.И. Лутидзе.

В результате преобразования получена система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и новыми комплексными переменными. Новые комплексные переменные характеризуют мгновенные значения результирующих векторов токов и напряжений обмоток, представленных в комплексной плоскости. Уравнения для комплексных относительных величин в операторной форме после приведения к обмотке ротора записаны в виде:

$$\begin{aligned} \bar{U}_c + \rho \chi_{cc} \bar{I}_{oc} + \rho \chi_{cm} \bar{I}_{os} + \rho \chi_{cp} \bar{I}_{op} &= (z_{ic} + \rho \chi_{cc}) \bar{I}_c + \rho \chi_{cm} \bar{I}_s + \rho \chi_{cp} \bar{I}_p, \\ \rho \chi_{cm} \bar{I}_{oc} + \rho \chi_{ss} \bar{I}_{os} + \rho \chi_{mp} \bar{I}_{op} &= \rho \chi_{cm} \bar{I}_c + (z_s + \rho \chi_{ss}) \bar{I}_s + \rho \chi_{mp} \bar{I}_p, \\ \rho \chi_{mp} \bar{I}_{oc} + \rho \chi_{ms} \bar{I}_{os} + \rho \chi_{pp} \bar{I}_{op} &= (\rho - j) \chi_{mp} \bar{I}_c + (\rho - j) \chi_{ms} \bar{I}_s + [z_{ip} + \chi_{pp} (\rho - j)] \bar{I}_p, \end{aligned} \quad |16|$$

где $z_{ic}, z_{ip}, z_{is}, \chi_{cc}, \chi_{ss}, \chi_{pp}$ — активные и полные индуктивные сопротивления фаз обмоток преобразованного ЭМУ-РЧ,
 χ_{m} — сопротивление взаимной индукции обмоток,
 $\bar{U}_c, \bar{I}_c, \bar{I}_s, \bar{I}_p$ — комплексные результирующие вектора напряжения и тока в области изображения,
 $\bar{I}_{oc}, \bar{I}_{os}, \bar{I}_{op}$ — значения этих токов в начале коммутационного интервала.

В качестве базисных параметров приняты:
 частота $\omega_{\delta} = \omega_{\rho}$,
 ток $i_{\delta} = I'_{нм}$,
 напряжение $U_{\delta} = U'_{нм}$,
 где $I'_{нм}, U'_{нм}$ — амплитудные значения номинального фазного тока и напряжения выходной обмотки приведенные к ротору при $f_{вых ном}$.

Для упрощения решения уравнений /16/ рассматривается случай, когда индуктивные сопротивления рассеяния обмотки управления и обмотки ротора равны нулю. Последнее справедливо при емкостной компенсации реактивной составляющей тока в роторе. Найдены выражения для результирующих векторов тока обмоток ЭМУ-РЧ

$$\begin{aligned} \bar{I}_c(t) &= \frac{U_c}{z_c} + \frac{z_{ip} \chi_{m} \cdot (z_{is} \bar{I}_{os} + \bar{U}_c)}{z_{ic} \cdot \chi_{is}^s \cdot (z_{ip} - j \chi_{m}) - \chi_{m} z_{is} \cdot (z_{ic} + z_{ip})} e^{\alpha t} + \\ &+ \frac{z_{ic}^2 \bar{I}_0 \cdot (\chi_{m} \chi_{is}^s + z_{ip} z_{is} - j z_{is} \chi_{m}) + [(z_{ic} - z_{is}) \cdot (z_{is} + z_{ip}) - j z_{is} \chi_{is}^s] \cdot z_{ip} \bar{U}_c}{z_{ic} \chi_{is}^s \cdot (z_{ic} + z_{ip})^2} e^{\beta t}, \end{aligned}$$

$$\bar{I}_p(t) = \frac{z_{ic} z_{is} \chi_{m} \bar{I}_{oc} + j \chi_{m} z_{ic} \cdot (\chi_{m} \Sigma \bar{I}_0 + \chi_{is}^s \bar{I}_{os})}{z_{ic} \chi_{is}^s \cdot (z_{ip} - j \chi_{m}) - \chi_{m} z_{is} \cdot (z_{ic} + z_{ip})} e^{\alpha t} +$$

|17|

$$+ \frac{z_{ic} \chi_{m} \Sigma \bar{I}_0 \cdot [(z_{ic} \chi_{m} + z_{ic} \chi_{is}^s + z_{is} \chi_{m}) + j (\chi_{m} \chi_{is}^s - z_{ic} z_{is})] + j z_{ip} \bar{U}_c \cdot (z_{ip} \chi_{is}^s - z_{is} \chi_{m})}{\chi_{m} \cdot (z_{ic} + z_{ip}) \cdot (z_{ic} \cdot \chi_{is}^s - j z_{is}^2)} e^{\beta t},$$

$$\bar{I}_s(t) = \frac{z_{ip} \chi_{m} (z_{ic} \Sigma \bar{I}_0 - \bar{U}_c) + \bar{I}_{os} (z_{ic} z_{ip} \chi_{is}^s - z_{ic} z_{is} \chi_{m} - z_{ip} z_{is} \chi_{m}) - j \chi_{m} z_{ic} (\chi_{m} \Sigma \bar{I}_0 + \chi_{is}^s \bar{I}_{os})}{z_{ic} \chi_{is}^s \cdot (z_{ip} - j \chi_{m}) - z_{is} \chi_{m} \cdot (z_{ic} + z_{ip})} e^{\alpha t} +$$

$$+ \frac{z_{ip} \chi_{m} \cdot (z_{ic} \Sigma \bar{I}_0 - \bar{U}_c) - j z_{ic} \chi_{m}^2 \cdot \Sigma \bar{I}_0}{z_{is} \chi_{m} \cdot (z_{ip} + z_{is}) - z_{ic} \chi_{is}^s \cdot (z_{ip} - j \chi_{m})} e^{\beta t},$$

$$\alpha = -\frac{z_{is}}{\chi_{is}^s}, \quad \beta = -\frac{z_{ic} z_{ip} + j \chi_{m} z_{ic}}{\chi_{m} \cdot (z_{ic} + z_{ip})}, \quad \Sigma \bar{I}_0 = \bar{I}_{oc} + \bar{I}_{os} + \bar{I}_{op}, \dots$$

где χ_{is}^s — индуктивное сопротивление рассеяния фазы выходной обмотки включающее в себя индуктивное сопротивление нагрузки.

Матрицы обратного преобразования позволяют осуществить переход от комплексных значений токов к мгновенным значениям токов в фазах. В приложении приведена программа для ЭЦВМ, позволяющая на основе уравнений [17] рассчитывать все, интересующее, режимы работы ЭМУ-РЧ с УПК. В качестве примера рассчитаны и изображены годограф установления результирующего вектора \bar{U}_y при включении U_y , форма выходного напряжения ЭМУ, его внешняя характеристика.

Проведенные расчеты и построения результирующего вектора тока $O.Y.$ показали, что результирующий вектор тока в конце циклов максимален и направлен почти по оси последней фазы /из трех открытых в каждом такте/. На этом основании сделан вывод о том, что результирующий вектор создается практически током одной фазы, являющимся максимальным через ячейку УПК.

При известной результирующей н.с. обмотки управления величина тока ячейки определена, как

$$I_{\alpha} = \frac{\sum F_{\alpha y}}{W'_c}$$

где W'_c - число витков фазы $O.Y.$ с учетом обмоточного коэффициента.

Рассчитаны коммутационные перенапряжения на ячейках УПК при шунтировании их активным сопротивлением для снижения перенапряжений.

Ток в коммутируемой фазе изменяется по закону

$$i_c(t) = \left[i_{oc} \operatorname{ch} \beta t + \frac{i_{oc} \cdot 2d_2 \cdot M - \zeta M - \kappa^2 \cdot U_{\gamma}}{(1 - \kappa^2) \cdot \beta \cdot M} \operatorname{sh} \beta t \right] \cdot e^{-\zeta t}, \quad |18|$$

где i_{oc} - предкоммутационный ток фазы,

$$d_1 = \frac{\zeta + R_g}{2L_c}, \quad d_2 = \frac{\zeta}{2L_c},$$

$$\kappa^2 = \frac{M^2}{L_c^2}, \quad \zeta = \frac{d_1 + d_2}{1 - \kappa^2},$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \kappa^2} \cdot \sqrt{(d_1 + d_2)^2 + 4\kappa^2 \cdot d_1 \cdot d_2},$$

L_c - полная индуктивность фазы $O.Y.$,

R_g - сопротивление шунтирующее коммутируемую фазу,

M - взаимная индуктивность рядом расположенных фаз $O.Y.$

Длительность времени коммутации тока равно

$$t_x = \frac{A_{\text{нлн}} \cdot \beta M \cdot (1 - \kappa^2)}{i_{oc} \cdot 2d_2 \cdot (M - \zeta M - \kappa^2) \cdot U_{\gamma}} \quad |19|$$

Допуская линейное изменение тока секции за время коммутации t_x , перенапряжение на ячейках УПК определяется

$$U_{\text{нлн}} = L_c \cdot \frac{i_{oc}}{t_x} \quad |20|$$

Надежную работу силовых транзисторов в схеме УПК обеспечивает прежде всего правильно рассчитанная при проектировании УПК мощность срыва их во вторичной пробой. Условием надежной работы ячеек УПК является условие, когда при любых режимах работы сохраняется неравенство

$$L_c \cdot \frac{i_{\alpha}}{t_x} < P_{cp}, \quad |21|$$

где P_{cp} - мощность срыва во вторичной пробой выбранного транзистора.

Ввиду отсутствия технологического контроля транзисторов по мощности вторичного пробоя, рекомендуется в схему УПК ставить транзисторы, отобранные по величине этого параметра.

Разработанная схема УПК с разрезной обмоткой может быть рекомендована для получения вращающихся магнитных полей с регулируемой угловой скоростью вращения в различных электрических машинах /генераторах, двигателях, преобразователях/.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования макетных образцов усилителей и преобразователей с УПК.

Экспериментальные исследования тиристорного кольцевого коммутатора с замкнутой обмоткой подтвердили полученные для них теоретические выводы и зависимости. Полученный материал оформлен в виде таблиц и графиков.

Тиристорный УПК показал устойчивую, надежную работу в схемах двухкаскадного электромашинного преобразователя частоты и трехкаскадного электромашинного усилителя регулируемой частоты при любых значениях нагрузки от режима холостого хода до режима короткого замыкания во всем расчетном диапазоне частот.

При этом машинно-вентильные преобразователи имеют выходное напряжение по форме близкое к синусоидальному, внешние характеристики, присущие характеристикам электромашинных преобразователей частоты. Быстродействие находится на уровне статических преобразователей.

Проведено технико-экономическое сравнение бесколлекторного электромашинного усилителя регулируемой частоты со статическим преобразователем на плоскостных транзисторах. Сопоставляются преобразователи, позволяющие осуществлять одинаковые функции при одинаковых выходных параметрах: $P_{вых} = 1,1 \text{ кВт}$, $f_{вых} = 50 \div 400 \text{ гц}$.

Анализ позволил заключить, что БЭМУ-РЧ, наряду с хорошими техническими данными, имеет меньшую себестоимость изготовления / 1807 руб., для статического преобразователя - 2306 руб./ и эксплуатационные расходы / при двухменном режиме работы и нормальных условиях эксплуатации 389 руб., для статического преобразователя - 414 руб./, что подтверждает целесообразность разработок в области создания машино-вентильных усилителей и преобразователей регулируемой частоты.

По схеме рис.2 изготовлен опытный образец ЭМУ-РЧ с транзисторным коммутатором. Электромашинная часть выполнена на базе серийного ЭМУ-12А. Габариты электромашинной части ЭМУ-РЧ 585 x 213 x 345, вес 69 кг. УПК выполнен в виде отдельного прибора с габаритами 297 x 190 x 217, вес 10 кг.

Номинальные данные образца:

Выходная мощность	- 800 вт,
Напряжение	- 220 в,
Ток	- 1,2 а,
Частота	- 170 гц.

Учитывая принципиальную возможность применения различных законов переключения фаз О.У. для получения вращающегося магнитного поля, были исследованы различные законы коммутации фаз при сравнении их по жесткости входной частотной характеристики, коммутационным перенапряжениям, коэффициенту усиления ЭМУ-РЧ. Лучшим по показателям оказался закон шеститактной несимметричной коммутации ... 1,2 - 2,3 - 3,4 - 4,5 - 5,6 - 6,1 - 1,2.....

Для использования положительной относительно коллектора транзистора э.д.с., наводимой в фазах О.У. общим магнитным полем генератора, применены неуправляемые диоды, включенные параллельно ячейкам УПК. Применение обратных диодов повышает коэффициент усиления, коэффициент использования тока, уменьшает установленную мощность силовых управляемых элементов УПК.

При малых нагрузках для устранения самовозбуждения ЭМУ-РЧ эффективно включение подмагничивающей обмотки в цепь обратных диодов. Подобное включение обмотки может быть рекомендовано и в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе для снижения токов и перенапряжений в инверторе, когда двигатель переходит в генераторный режим.

В цепи роторной и выходной обмоток включены небольшие емкости $C_p = 7 \text{ мкф}$, $C_s = 10 \text{ мкф}$. Емкостный ток, являясь подмагничивающим, снижает мощность на входе УПК, повышает K_u . Одновременно наличие емкостей значительно улучшает форму тока и напряжения на выходе, а также снижает коммутационные перенапряжения.

В качестве нагрузки при исследовании ЭМУ-РЧ использовалось активное сопротивление и высокоскоростной двигатель ДАТ - 600 - 6.

Частотный диапазон ЭМУ-РЧ составляет 30 + 175 гц. В контактно-ном исполнении в диапазоне 30 + 165 гц без дополнительных устройств изменение выходного напряжения при изменении частоты подчиняется основному закону частотного регулирования.

В бесконтактном варианте этот диапазон при работе дополнительного каскада в режиме двигателя составил 30 + 120 гц, в режиме генератора - 30 + 100 гц.

ЭМУ-РЧ имеет достаточно жесткие внешние характеристики. Для контактного варианта падение внешней характеристики без подмагничивающей обмотки составляет 35%, с подмагничивающей обмоткой 15% / при номинальной выходной частоте и изменении тока нагрузки от 0 до номинального /.

В ЭМУ-РЧ при применении его в следящих автоматизированных системах следует различать два коэффициента усиления:

- коэффициент усиления по каналу управления частотой,
- коэффициент усиления по каналу управления выходным напряжением.

Первый определяется как отношение выходной мощности ЭМУ-РЧ к мощности управления задающим генератором и равен у образца $10^4 \div 10^5$. Второй определяется как отношение выходной мощности ЭМУ-РЧ к мощности входа от источника управления и равен 12-60 в диапазоне выходных частот 30-170гц.

Быстродействие также определяется при управляющем воздействии по частотному каналу и каналу напряжения. При управлении по частотному каналу ЭМУ-РЧ ведет себя как безинерционное звено. Быстродействие по каналу управления напряжением составило 0,02 + 0,04сек.

Центральная научная библиотека Академии наук Киргизской ССР

Исследование формы выходного напряжения показали, что ЭМУ-РЧ имеет форму выходного напряжения, близкую к синусоидальной во всем частотном диапазоне / рис. 3/.

К.П.Д. образца составляет $\approx 0,5$ во всем частотном диапазоне, когда мощность скольжения из ротора подается на вход, либо выход ЭМУ-РЧ.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертации обобщены в выводах:

1. Разработан и исследован тиристорный УПК с замкнутой обмоткой якорного типа для создания вращающихся магнитных полей в электрических машинах /в принципе любых: двигателях, генераторах, преобразователях и т.д./.

2. Определены для данной системы УПК-О.У. максимально возможная угловая скорость вращения магнитного поля и критическая частота, ниже которой включение УПК в работу недопустимо, т.к. это приводит к короткому замыканию источника управления. Получено условие устойчивой работы коммутатора. При равенстве первого этапа коммутации времени восстановления запиорных свойств применяемых тиристоров работа УПК устойчива.

3. Установлено, что при проектировании системы УПК - обмотка возможно увеличение количества отводов от обмотки в приемлемых пределах с целью снижения установленной мощности силовых элементов УПК. На основании того, что тиристоры и диоды работают в импульсном режиме выбор их следует проводить по ампер-секундным характеристикам с меньшими номинальными данными по току и напряжению.

4. Экспериментально подтверждены теоретические выводы для тиристорного УПК с замкнутой обмоткой, показана его надежная работа в схемах электромашинного усилителя и преобразователя при хороших выходных характеристиках. Проведенный технико-экономический анализ электромашинного усилителя регулируемой частоты показал, что, наряду с рядом технических преимуществ, последний имеет меньшую себестоимость изготовления и эксплуатационные расходы по сравнению со статическим преобразователем.

5. Предложено в качестве источника регулируемой частоты схемы электромашинного усилителя на базе асинхронного генератора. Для возбуждения усилителя разработана транзисторная схема УПК с разрезной обмоткой управления.

6. Составлены и решены дифференциальные уравнения, описывающие поведение усилителя в установившихся и переходных режимах с учетом специфики, вносимой коммутатором в работу машины.

7. На основании теоретического и экспериментального анализа установлено, что в режиме критического скольжения поток возбуждения асинхронного генератора при шестифазной разрезной обмотке управления создается практически током одной фазы О.У. и при создании вращающегося поля возбуждения шестифазной разрезной обмоткой целесообразно применять закон шеститактной коммутации - 1,2 - 2,3 3,4 - 4,5 - 5,6 - 6,1 - 1,2 фаз О.У.

8. Для повышения коэффициента усиления ЭМУ-РЧ и лучшего использования обмотки управления параллельно управляемым ячейкам транзисторного коммутатора включать неуправляемые диоды.

С целью устранения самовозбуждения ЭМУ-РЧ при малых токах нагрузки в цепь обратных диодов эффективно включение подмагничивающей обмотки, намотанной вокруг спинки статора асинхронного генератора.

Подобное включение может быть рекомендовано и в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе для снижения токов и напряжений в инверторе, когда асинхронный двигатель переходит в генераторный режим.

9. Экспериментальные исследования опытного образца ЭМУ-РЧ с транзисторным УПК показали возможность его использования как источника стабилизированной или регулируемой частоты при наличии первичного вала, вращающегося с постоянной, либо с переменной скоростью.

Материалы диссертации были доложены на третьей Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем в г. Ташкенте в ноябре 1967 года, на шестой Всесоюзной научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства в г. Томске в июне 1969 года, на второй традиционной конференции кафедры электрических машин Томского политехнического института в мае 1969 г., на научно-техническом семинаре по бесконтактным двигателям постоянного тока малой мощности в г. Ленинграде в октябре 1969 года, на семинарах кафедр электрических машин и общей электротехники ТПИ в 1966-1969 гг.

Результаты работы внедряются в электротехнической промышленности.

Основное содержание диссертации опубликовано в статьях:

1. Исследование коммутационного процесса в обмотке управления бесколлекторного электромашинного усилителя регулируемой частоты /соавтор А.И.Скороспешкин/. Известия ТПИ, т. 172, 1967.
2. Исследование вентильной коммутации в обмотке якорного типа / соавтор А.И.Скороспешкин/. Тезисы докл. третьей Всесоюзной межвуз. конф. по теории и методам расчета нелинейных цепей и систем. Изд. ФАН, Ташкент, 1967.
3. Зависимость величины установившегося тока в обмотке управления БЭМУ-РЧ от частоты сигналов управления /соавтор А.И.Скороспешкин/. Известия ТПИ, т. 190, 1968.
4. Техничко-экономическая оценка бесколлекторного электромашинного усилителя с регулируемой частотой /соавторы А.С.Батурин, А.И.Скороспешкин, Ш.С.Ройз/, Известия ТПИ, т.172, 1967.
5. Управляемый полупроводниковый коммутатор с разрезной обмоткой управления /соавтор А.И.Скороспешкин/. Доклады к шестой научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства, том У, Томск, 1969.
6. Электромашинный усилитель с управляемым полупроводниковым коммутатором /соавторы А.И.Скороспешкин, Ш.С.Ройз/. Известия ТПИ, т. 212. / в печати/.
7. Экспериментальное исследование основных характеристик электромашинного усилителя с управляемым полупроводниковым коммутатором /соавторы А.И.Скороспешкин, Ш.С.Ройз/ Известия ТПИ, т. 212 / в печати/

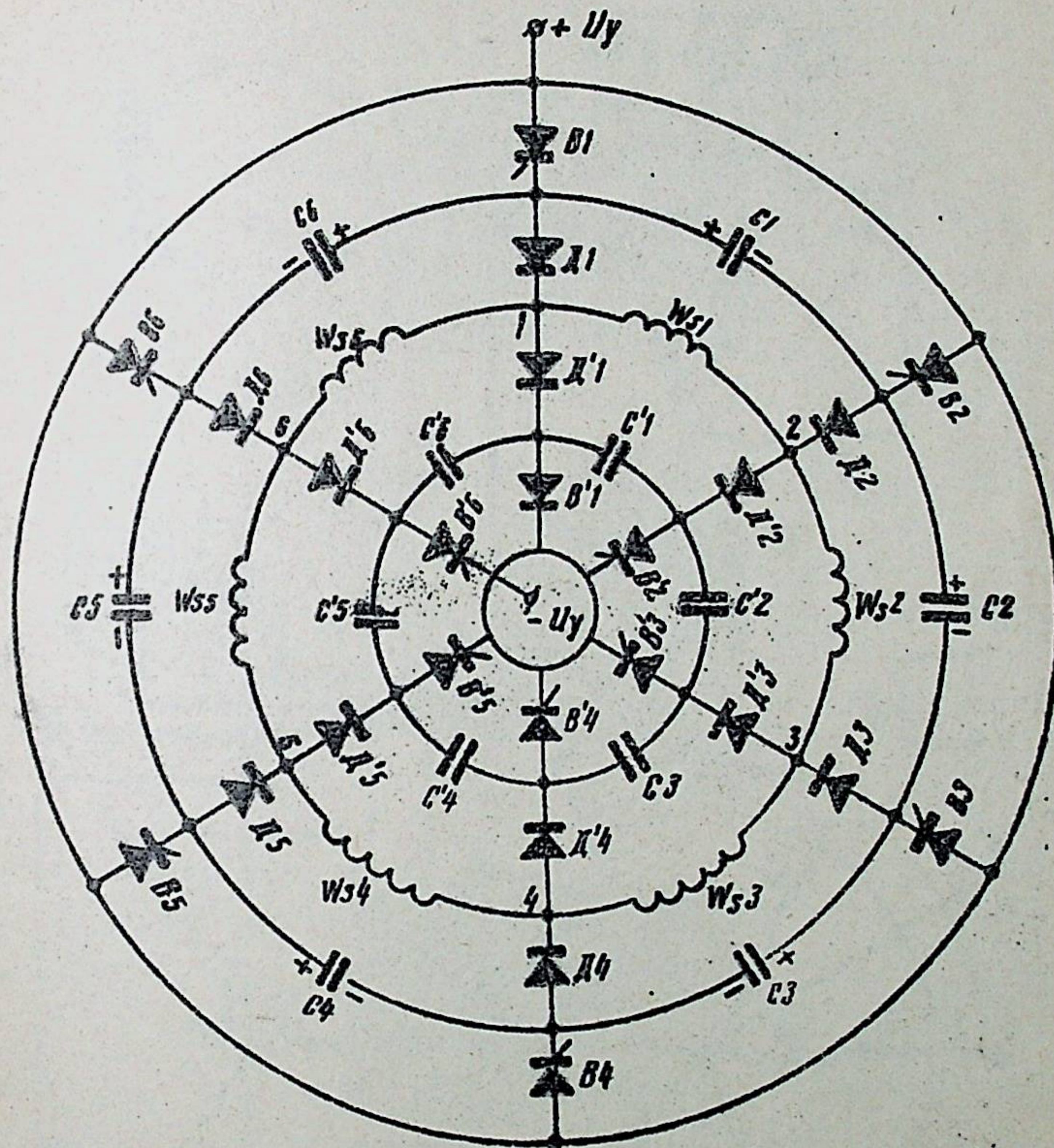


Рис. 1- Силовая электрическая схема УПК в обмоткой замкнутого типа.