

М 173737

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

МАЛАНЬИН В. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТИРИСТОРНЫХ
КЛЮЧЕЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

(05.253—Приборы и устройства автоматики и телемеханики)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
кандидат технических наук, доцент Рейнеке И. А.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, проф. Вамберский М. В.,
кандидат технических наук, доцент Юркевич В. М.

Ведущее предприятие — ~~Московский завод~~

Автореферат 1972 г.

Защита диссертации 1972 г.

на заседании Московского ордена
Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшего технического училища по адресу: Москва,

Ваши отзывы и замечания просим направлять по адресу: Москва,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
технического училища.

Ученый секретарь
к. т. н., доцент

фенов

М173732

М173737

Одним из важных классов преобразователей электрической энергии являются преобразователи постоянного напряжения в постоянный с другими параметрами (без звена переменного тока), основанные на методе непрерывного или импульсного регулирования. Импульсные преобразователи обладают преимуществами, обусловившими их значительное распространение.

Основу таких преобразователей составляет регулятор — импульсный ключ, в качестве которого могут быть использованы существующие управляемые полупроводниковые приборы: транзисторы, тиристоры. Известные преимущества тиристоров по сравнению с транзисторами определили их широкое применение в качестве импульсных ключей.

Использование однооперационных тиристоров в системах управления постоянным током приводит к некоторому усложнению регулятора за счёт введения дополнительных элементов для обеспечения коммутации тиристора.

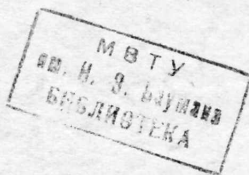
Начавшаяся разработка высоковольтных транзисторов с большими коллекторными токами не снижает важности поиска новых схемных решений ключей с использованием однооперационных тиристоров.

Вопросам разработки и исследования импульсных тиристорных ключей (ИТК) уделяется большое внимание как в нашей стране, так и за рубежом. Значительный вклад в теорию и разработку преобразователей с ИТК внесли Т.А.Глазенько, А.Ф.Крогерис, А.С.Сандлер, Ю.Г.Толстой, И.Л.Каганов, О.А.Коссов, В.А.Лабунцов и другие.

В настоящее время существуют многочисленные способы и схемы для искусственной коммутации тиристоров в цепях постоянного тока.

Наиболее важным требованием, часто определяющим выбор той или иной схемы ИТК, является обеспечение надёжности коммутации, так как срыв коммутации (рабочий тиристор остаётся открытым) в большинстве случаев равносителен возникновению аварийного режима.

Стремление обеспечить более высокую надёжность коммутации, приводит к увеличению числа элементов и усложнению схемы ИТК, что само по себе уменьшает надёжность. В существующих



типах ИТК несмотря на то, что процессы в них не полностью идентичны и отличаются в деталях, общим для них остаётся возможность нарушения коммутации, особенно в динамических режимах.

На кафедре "Теоретические основы электротехники" МВТУ им. Баумана Н.Э. предложена и применяется схема ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией (рис. 1), обладающая высокой надёжностью коммутации при любых режимах работы вплоть до короткого замыкания на выходе ключа.

На основании вышеизложенного были определены следующие основные задачи, которые решались в диссертации:

1. Сравнение основных типов ИТК и предлагаемой схемы с последовательной ёмкостной коммутацией как по надёжности, так и по основным характеристикам.
2. Исследование блочной структуры преобразователей с точки зрения повышения надёжности коммутации тиристоров, увеличения мощности устройства и частоты выходных импульсов.
3. Исследование предлагаемой схемы ИТК в различного рода системах управления постоянным током и разработка основ выбора элементов преобразователей.
4. Разработка схем управления и экспериментальное исследование преобразователей на базе ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, раздела "Заключение" и приложения.

Глава I. Сравнительный анализ импульсных тиристорных ключей.

Рассмотрены электромагнитные процессы в наиболее типичных схемах ИТК с параллельной ёмкостной коммутацией (с L_k - C_k контуром, с насыщенным трансформатором, со вспомогательным тиристором) и в предлагаемой схеме с L - C - A фильтром при работе на активную нагрузку.

При исследовании электромагнитных процессов основные допущения, принятые при этом, сводятся к следующим: все управляемые и неуправляемые вентили имеют идеальные вольтамперные характеристики; сопротивления всех цепей схемы, включая источник питания, равны нулю; индуктивности имеют линейные характеристики. Принятые допущения не оказывают существенного влияния на характер электромагнитных процессов, но значительно

упрощают анализ, проведённый методом кусочнолинейной аппроксимации. Выходное напряжение U_n принято неизменным в течение цикла работы и величина его определяется режимом работы и системой управления.

В результате анализа получены уравнения токов и напряжений в схемах ИТК на различных коммутационных интервалах. Приведены выражения средних и максимальных токов в элементах схемы, в нагрузке и источнике питания. Определено время, предоставляемое тиристорам для восстановления запирающих свойств. В предлагаемом ИТК время открытого состояния ключа неизменно и определяется параметрами самой схемы.

В существующих типах ИТК коммутирующий конденсатор при помощи схемы коммутации подключается параллельно запираемому тиристорам, создавая обратное напряжение. Длительность приложения обратного напряжения зависит от: величины коммутирующей ёмкости C_k ; величины напряжения на конденсаторе C_k (величины разрядного тока). Коммутационная надёжность при этом может быть достигнута только для ограниченного числа режимов работы ИТК. Особенно трудно обеспечить надёжную коммутацию в динамических режимах (такие, как включение, внезапное увеличение нагрузки). В случае значительных перегрузок (даже кратковременных) обеспечение надёжности коммутации возможно только ценой значительного увеличения веса, габаритов и стоимости всего устройства, так как при достаточно быстром перезаряде время отводимое для восстановления запирающих свойств t_v может стать меньше $t_{a, \text{гон}}$ и произойдёт срыв коммутации.

В схеме ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией процесс закрытия тиристоров иной. Закрытие тиристоров происходит за счёт естественного спада тока до нуля, а затем прикладывается обратное напряжение в момент открытия следующей пары тиристоров. Если время между окончанием перезаряда C_k и открытием очередной пары тиристоров будет больше, чем время $t_{a, \text{гон}}$, то надёжность коммутации будет обеспечена при любых режимах работы ключа. Предельная частота тиристора в этом случае (рис. 2) определяется выражением

$$f_{np} \leq \frac{1}{2(t_p + t_n)} \quad (I)$$

При $t_n = K_3 t_{a, \text{гон}}$ ($K_3 = 1,5 + 2,0$ - коэффициент запаса) выполнение условия (I) является необходимым и достаточным для надёжной

коммутации в любых режимах работы и при любом изменении нагрузки вплоть до короткого замыкания.

Для увеличения выходной частоты преобразователей могут быть использованы блочные системы. В этом случае преобразователь состоит из нескольких одинаковых ключей (блоков) (рис. 3), работающих со сдвигом во времени, что обеспечивается схемой управления. Определены требования к таким системам. Блочные системы преобразователей имеют ряд преимуществ по сравнению с работой одного ключа: возможность увеличения частоты подзаряда выходной ёмкости фильтра (снижения пульсации U_n) без увеличения частоты работы каждого ключа; возможность получения больших выходных мощностей; при применении предлагаемой схемы ИТК одновременно с указанными преимуществами может быть увеличена надёжность коммутации, в то время как блочные преобразователи с существующими ИТК не приводит к увеличению надёжности.

В таблице № I приведены некоторые основные характеристики анализируемых типов ИТК в режиме прерывистых токов в индуктивности фильтра. ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией вполне выдерживает сравнение с другими типами ключей по основным характеристикам и значительно превосходит их по надёжности коммутации, особенно в динамических режимах. Наличие 4-х тиристоров в схеме не является недостатком, так как ключ двойной, т.е. за один цикл работы происходит двойная подзарядка выходной ёмкости фильтра.

Таким образом, ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией может быть рекомендован для применения в различных системах управления постоянным током.

Глава II. Преобразователь постоянного

напряжения со стабилизированным выходом.

Рассмотрено применение ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией в преобразователе постоянного напряжения со стабилизированным выходом (рис. I) для случая, когда напряжение на нагрузке меньше напряжения питания ($U_n < U_n$). Регулирование (стабилизация) выходного напряжения обеспечивается путём изменения частоты следования импульсов открытия тиристорov (частотно-импульсное регулирование). Величина напряжения на нагрузке определяется уравнением

$$U_n = 2U_n \sqrt{R_n \cdot C_k \cdot f} \quad (2)$$

Существенным вопросом является расчёт пульсации выходного напряжения в схеме стабилизатора. Расчётная формула для пульсаций, определяемых параметрами силовой части

$$\Delta U_n = \frac{1}{C_{\Phi}} \left\{ C_k U_n \left[1 + \sqrt{(2K_T - 1)^2 - \lambda^2} \right] + \frac{C_k U_n}{2} \left[2\sqrt{K_T(K_T - 1)} - \lambda \right]^2 - \right. \\ \left. - \frac{I_n}{\omega} \arccos \frac{2\lambda\sqrt{K_T(K_T - 1)} - \sqrt{(2K_T - 1)^2 - \lambda^2}}{(2K_T - 1)^2} \right\} \quad (3)$$

где ΔU_n - двойная амплитуда пульсации;

$\lambda = \frac{I_n}{U_n} \sqrt{\frac{L_{\Phi}}{C_k}}$ - коэффициент нагрузки.

На основании проведённого анализа и полученных уравнений (глава I) приводится порядок расчёта стабилизатора.

Для выполнения заданного качества стабилизации во всём возможном диапазоне изменения напряжения питания и тока нагрузки ёмкость C_k должна быть выбрана из условия обеспечения максимально допустимого тока в нагрузке $I_{\text{н макс}}$ при наименьшем перепаде напряжения $\Delta U = U_n - U_n$. С увеличением же ёмкости C_k растут пульсации выходного напряжения (3). Для уменьшения фильтра желательно уменьшение C_k , но при этом должна быть увеличена частота, что связано с переходом к блочным схемам, так как частота работы тиристоров ограничена частотными свойствами самих тиристоров и кроме того наложенным ограничением для надёжной коммутации (I). Величина ёмкости C_k ориентировочно определяется выражением

$$C_k = \frac{I_n}{4U_n K_T f} ; K_T = \frac{U_n}{U_n} < 1 \quad (4)$$

Приведены примеры расчёта силовой части преобразователей с одиночным ключом и по блочной схеме, предназначенных для электропитания радио- и автоматической аппаратуры и результаты экспериментального исследования разработанных макетов. Габариты фильтра определяются полностью нижним пределом нагрузочного тока при заданной амплитуде пульсации.

Исследования показали высокие динамические свойства схемы ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией.

Глава III. Преобразователь постоянного напряжения с параллельным импульсным ключом (вольто-добавочное устройство).

В существующих системах электропитания, особенно в системах с автономными источниками и буферными батареями, весьма актуальным является вопрос ограничения уровней напряжения у потре-

бители, так как имеют место значительные колебания уровней питающего напряжения.

Один из возможных способов ограничения нижнего уровня напряжения — применение системы с поперечным импульсным регулированием, в которой вольтодобавочный эффект получается за счёт периодического запасаания энергии в индуктивности, включённой в главную токовую цепь.

В качестве ключа в таком устройстве может быть применён тиристорный ключ с последовательной ёмкостной коммутацией, обладающей высокой степенью надёжности. Из анализа электромагнитных процессов в вольтодобавочном устройстве получено выражение для среднего значения тока нагрузки

$$I_n = 4C_k U_n \frac{K_T}{K_T - 1} \cdot f; \quad K_T = \frac{U_n}{U_n} > 1, \quad (5)$$

которое может быть использовано для определения требуемой величины ёмкости коммутирующего конденсатора.

В исследуемом устройстве максимальные пульсации напряжения на нагрузке определяются выражением

$$\Delta U_n = \frac{C_k}{C_\Phi} \cdot \frac{K_T}{K_T - 1} \cdot 2U_n (1 - \sqrt{K_T}). \quad (6)$$

Для большинства существующих систем электропитания требуется небольшое повышение напряжения ($K_T = 1,1 + 1,2$) при допустимой величине пульсации на нагрузке $0,5\% U_n$. Применённый в этом случае упрощённый метод анализа и полученные соотношения позволили предложить ориентировочный порядок расчёта и выбора элементов таких устройств. Для снижения пульсации можно рекомендовать применение блочных схем.

Результаты экспериментального исследования разработанных устройств с одиночным ключом и в блочном исполнении показали, что получение вольтодобавочного эффекта в рассматриваемом преобразователе реализуется практически просто. Однако, выполнение обычно достаточно жёстких требований в отношении пульсации на выходе, коэффициента полезного действия и веса вызывает значительные затруднения.

При больших токах нагрузки и широком диапазоне его изменений главные трудности возникают из-за: сложности работы блокирующего диода при повышенных частотах; влияния внутреннего сопротивления источника питания; необходимости увеличения фильтра для выполнения условий по пульсации.

Разработанная система управления обеспечивает автоматическое включение вольтодобавочного устройства при понижении входного напряжения ниже установленного уровня $U_{\text{вкл}}$. Если входное напряжение выше $U_{\text{вкл}}$, то схема управления прекращает генерировать импульсы открытия тиристоров и напряжение на нагрузке U_n становится равным входному напряжению (за вычетом падений напряжения на индуктивности, в блокирующем диоде).

Глава IV. Другие примеры использования ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией.

1. Рассматривается возможность управления скоростью двигателя постоянного тока на примере исполнительного двигателя типа СЛ-521.

Приводятся результаты приближённого расчёта тока через тиристоры на первых интервалах пуска двигателя. Наиболее опасным является второе включение ИТК, при котором ток через тиристоры имеет наибольшую величину.

Экспериментальные скоростные и регулировочные характеристики соответствуют теоретическим, которые получаются при импульсном регулировании. В качестве нагрузки двигателя в экспериментальной установке применялся электромагнитный тормоз.

В системе стабилизации скорости двигателя полученные результаты экспериментального исследования показали:

1). Предлагаемая схема управления с помощью ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией обеспечивает широкий диапазон регулирования скорости при надёжной коммутации тиристоров.

2). Система стабилизации позволяет получить жёсткие скоростные характеристики.

П. Для ряда промышленных объектов и устройств необходимо осуществлять регулирование мощности на активной нагрузке. Одним из требований в этом случае является требование наименьших потерь энергии при регулировании. Этому требованию в достаточной степени отвечает импульсное регулирование. Анализ процессов при использовании в качестве ключа ИТК с последовательной коммутацией показал, что при фиксированной частоте управления выходная мощность $P_{\text{вых}}$ (мощность на нагрузке) постоянна при изменении сопротивления нагрузки R_n и определяется выражением

$$P_{\text{вых}} = 4C_k U_n^2 f \quad (7)$$

Ш. Одним из примеров возможного применения ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией является использование его в качестве генератора однополярных импульсов для сварки и электроэрозионной обработки металлов. Эрозионная нагрузка, эквивалентное сопротивление которой изменяется от нуля до бесконечности, предъявляет особые требования к схемам запираания тиристоров. В предлагаемой схеме ИТК обеспечивается надёжная коммутация тиристоров при коротком замыкании на выходе ключа.

Целесообразность применения ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией в этом случае может быть решена окончательно после анализа работы схемы на нелинейную нагрузку, которую представляет собой эрозионный промежуток.

Глава У. Схемы управления преобразователями постоянного напряжения.

Глава посвящена разработке системы управления преобразователями постоянного напряжения. Сформулированы требования к системе управления для надёжной коммутации тиристоров.

Изменение (стабилизация) выходного напряжения (среднего значения) преобразователей осуществляется путём частотно-импульсного метода регулирования.

Рассматриваемая система управления может работать без каких-либо изменений как в преобразователях постоянного напряжения со стабилизированным выходом, так и в вольтодобавочном устройстве при работе с одиночными ключами, либо выполненных по блочной схеме.

Структурная схема системы управления приведена на рис. 4 и состоит из следующих блоков:

1. Блок питания (БП) обеспечивает питание стабилизированным напряжением схемы управления, а также потенциальную развязку отдельных элементов схемы. Блок питания состоит из двух устройств: стабилизатора постоянного напряжения и релаксационного автогенератора с трансформаторной обратной связью, собранного по двухтактной схеме с общим эмиттером. Напряжения со вторичных обмоток трансформатора после выпрямления позволяют питать устройства управления, нуждающиеся в потенциальной развязке с источником входного напряжения, и создать независимые источники смещения в схемах управления.

2. Схема сравнения (СС) формирует сигнал рассогласования между текущим значением выходного напряжения (U_n) преобразо-

ватели и его заданным уровнем. Выходной сигнал схемы сравнения является управляющим для генератора импульсов.

3. Управляемый генератор импульсов (ГИ) служит для преобразования по определённому закону напряжения в частоту импульсов. Выходные импульсы регулируемой частоты являются импульсами продвижения для схемы феррит-триодного кольцевого распределителя импульсов. Рассмотрены два закона преобразования напряжения в частоту импульсов: пропорциональный и релейный. Соответственно разработано два варианта управляемого генератора импульсов. В первом случае генератор выдаёт сигнал в виде импульсов, частота которых пропорциональна (линейная зависимость) отклонению выходного напряжения от заданного. Во втором - схема генератора выдаёт импульсы управления, частота которых изменяется по релейному закону от величины рассогласования, вырабатываемой схемой сравнения.

4. Распределитель импульсов (РИ) обеспечивает включение тиристоров силового блока преобразователя в строго определённой последовательности. Распределитель собран по одноканальной схеме на феррит-транзисторных элементах.

5. Схема запуска (СЗ) обеспечивает определённую последовательность включения схемы управления, необходимую для нормального запуска и работы преобразователя напряжения.

Проведено экспериментальное исследование разработанной системы управления совместно с преобразователями постоянного напряжения с ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией.

В случае, когда в промежутке между двумя закрытыми состояниями схема управления с генератором, осуществляющим релейный закон регулирования, успевает генерировать несколько импульсов, уровень пульсации выходного напряжения преобразователя существенно увеличивается. Следует отметить, что при большой чувствительности схемы сравнения и отсутствии существенных запаздываний в передаче сигнала, генерируемая схемой "пачка" импульсов состоит всего из одного импульса, а частота следования импульсов определяется в данном случае уровнем входного напряжения преобразователя и величиной тока нагрузки. При таком "псевдо-пропорциональном" управлении уровень пульсации выходного напряжения не выше, чем в случае применения схемы генератора с пропорциональным законом регулирования при значительно меньшей статической ошибке.

В а к л ю ч е н и е

1. Рассмотрены наиболее распространённые типы ИТК с ёмкостной коммутацией в преобразователях постоянного напряжения и сформулированы требования, предъявляемые к ним.
2. Предложена схема ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией, главное отличие которой от известных типов ИТК состоит в том, что нагрузка включена последовательно с тиристорами и коммутирующей ёмкостью.
3. Сравнительный анализ известных и предложенной схем ИТК по коммутационной надёжности показал, что схема ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией обладает высокой надёжностью при любых режимах работы вплоть до короткого замыкания на выходе ключа. Для обеспечения надёжной коммутации в предлагаемой схеме ключа достаточно выполнить единственное условие — ограничение частоты работы ключа.
4. Существенного увеличения частоты подзаряда ёмкости фильтра, а также получение большей выходной мощности можно достигнуть при блочных схемах преобразователей постоянного напряжения. Установлено, что в преобразователях по блочной схеме ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией может быть увеличена надёжность коммутации.
5. Сравнение ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией и известных схем по основным характеристикам, количеству элементов, весу позволяют рекомендовать предлагаемую схему ключа в системах управления постоянным током.
6. Разработаны схемы управления преобразователями с одним ключом, а также в блочном исполнении.
7. Проведён анализ работы ИТК с последовательной ёмкостной коммутацией в преобразователе постоянного напряжения со стабилизированным выходом и в вольтдобавочном устройстве. По полученным соотношениям показана возможность предварительного выбора параметров при расчёте подобных схем.
8. Рассмотрена возможность применения предлагаемой схемы ключа для: частотно-импульсного регулирования скорости двигателя постоянного тока; регулирования мощности на активной нагрузке.
9. Разработаны и изготовлены на базе предлагаемой схемы ИТК блоки питания радио- и автоматической аппаратуры с жёсткими техническими требованиями. Экспериментальные исследования схемы

ИТК в системах управления постоянным током подтверждают основные теоретические положения, изложенные в диссертации.

П р и л о ж е н и е

В данном разделе показаны: полная принципиальная схема и внешний вид разработанного преобразователя постоянного напряжения со стабилизированным выходом; внешний вид вольтодобавочного устройства; внешний вид плат блоков питания, генератора и распределителя импульсов разработанной системы управления.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Баранов Е.Н., Енин В.Н., Маланьин В.А. Тиристорный импульсный стабилизатор постоянного напряжения. Труды МВТУ, № 145, М., 1971 г.

2. Баринов И.Н., Курашова Л.И., Маланьин В.А., Рейнеке И.А. Вольтодобавочное устройство с поперечным регулированием. Труды МВТУ, № 145, М., 1971 г.

3. Курашова Л.И., Маланьин В.А., Рейнеке И.А. Импульсные тиристорные ключи. Труды МВТУ, № 145, М., 1971 г.

4. Маланьин В.А. К расчёту пульсации в стабилизаторе напряжения с L-C-D фильтром. Труды МВТУ, № 145, М., 1971 г.

5. Баринов И.Н., Баранов Е.Н., Енин В.Н., Курашова Л.И., Маланьин В.А., Рейнеке И.А. Тиристорные ключи с последовательной ёмкостью коммутаций и их применение (Тезисы доклада). Четвёртая Всесоюзная Межвузовская конференция по теории и методам расчёта нелинейных электрических цепей и систем. г. Ташкент, 1971 г.

6. Баранов Е.Н., Енин В.Н., Маланьин В.А., Рейнеке И.А. Анализ работы импульсного стабилизатора постоянного напряжения на тиристорах. Электротехническая промышленность. Серия "Преобразовательная техника", 4(28), Информэлектро, М., 1972 г.

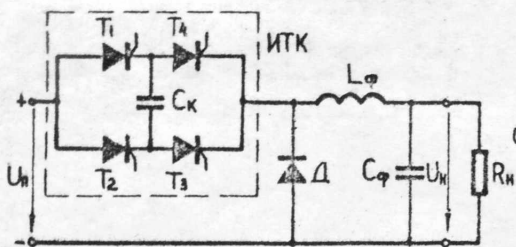


Рис.1

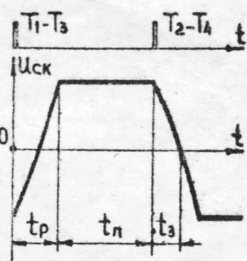


Рис.2

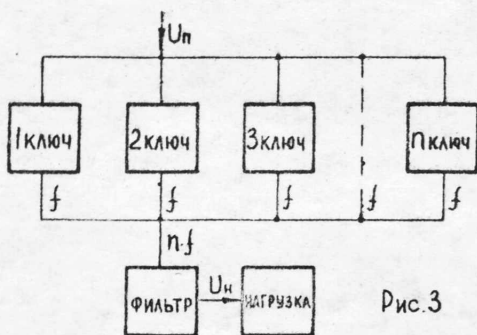


Рис.3

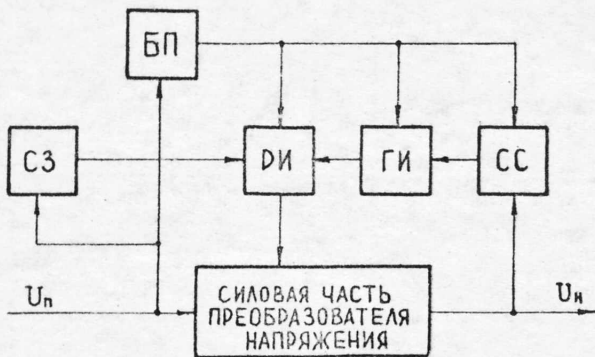


Рис.4

ТАБЛИЦА 1

СХЕМЫ ИТК ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	С LK-Ck КОНТУРОМ	С НАСЫЩАЮЩИМСЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ	СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ТИРИСТОРОМ	С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИЕЙ
МАКС НАПРЯЖЕНИЕ НА Ck (U _{co})	$\approx U_n + 2\sqrt{\frac{1}{2} U_n \Delta U}$	$\approx U_n + 2\sqrt{\frac{1}{2} U_n \Delta U}$	U _n	U _n
ВРЕМЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ (t _{восст})	$\frac{1}{\omega} \arccos \frac{\Delta U}{U_{co} + \Delta U}$	$\frac{1}{\omega} \arccos \frac{\Delta U}{U_n + \Delta U}$	$\frac{1}{\omega} \left[\arcsin \frac{\sqrt{(U_n + \Delta U)^2 + \frac{1}{2} \pi^2 \Delta U^2}}{U_n + \Delta U} + \arcsin \frac{\sqrt{(U_n + \Delta U)^2 + \frac{1}{2} \pi^2 \Delta U^2}}{U_n + \Delta U} \right]$	$\frac{1}{\omega} \left[\frac{2}{U_n} \sqrt{U_n \Delta U} + \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\Delta U}{U_n + \Delta U} \right]$
МАКСИМАЛЬНЫЙ ТОК ЧЕРЕЗ ТИРИСТОР (I _{Tmax})	$\sqrt{\frac{C_k}{L_k}} (U_{co} + \Delta U)$	$2 \sqrt{\frac{C_k}{L_k}} (U_{co} + \Delta U)$	$\sqrt{\frac{C_k}{L_k}} (U_n + \frac{1}{2} \Delta U)$	$\sqrt{\frac{C_k}{L_k}} U_n (2 - \frac{U_n}{U_n})$
СРЕДНИЙ ТОК ЧЕРЕЗ ТИРИСТОР	$f C_k (2 U_{co} + \frac{1}{2} \pi^2 \Delta U)$	—	$f C_k (2 U_n + \frac{1}{2} \pi^2 \Delta U)$	$f C_k 2 U_n$
СРЕДНИЙ ТОК НАГРУЗКИ	$f C_k \frac{(U_{co} + U_n)^2}{2 U_n}$	—	$f C_k \frac{U_n}{U_n} (2 U_n + \frac{1}{2} \pi^2 \Delta U)$	$f C_k \frac{4 U_n^2}{U_n}$
ЧАСТЬ ТОКА НАГРУЗКИ ОПРЕДЕЛЯЕМАЯ ТОКОМ ПЕРЕЗАРЯДА Ck	$f C_k (U_{co} + U_n)$	—	$f C_k 2 U_n$	$f C_k 4 U_n$
МАКСИМАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ НА ТИРИСТОРЕ	U _{co}	U _{co}	U _n	U _n
ЧИСЛО ИМПУЛЬСОВ ПОДЗАРЯДА ЕМКОСТИ ФИЛЬТРА ЗА ЦИКЛ	ОДИН	ДВА	ОДИН	ДВА
ОБОЗНАЧЕНИЯ	$\xi = \frac{L_k}{L_k}; \omega = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k}}$	$\eta = \frac{L_{TP}}{L_k}; \omega = \sqrt{\frac{1}{(L_{TP} + L_k) C_k}}$	$\xi = \frac{L_k}{L_k}; \omega = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k}}$	$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k}}$
	$\Delta U = U_n - U_n; f$ - ЧАСТОТА ВКЛЮЧЕНИЯ ТИРИСТОРА.			