

① 72-5
1115

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ

инж. РЕПИН А.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ *m*-ФАЗНЫХ
ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

К072744

Москва, 1971

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Введение.....	4
<u>Глава I.</u> Исходные предпосылки и методы анализа	
§ I.1. Исходные предпосылки.....	14
§ I.2. Методы анализа.....	19
<u>Глава II.</u> Параметрические состояния многофазных схем без потерь с комплексной нагрузкой индуктивного характера (режимы от холостого хода до короткого замыкания)	
Постановка задачи.....	30
А. Неуправляемые выпрямители.....	34
§ 2.1. Выражения переменных и уравнения угловых величин, их анализ и частные случаи ($L=0, L=\infty$). ..	35
§ 2.2. Физические результаты анализа и их сравнение с результатами при емкостной нагрузке.....	42
§ 2.3. Параметрические, частотные, нагрузочные и текущие относительные характеристики, обратное напряжение.....	45
§ 2.4. Упрощенные расчетные соотношения, погрешности и границы справедливости.....	61
§ 2.5. Простой способ определения пульсаций и индуктивности фильтра, недочеты известных способов и расчет схем.....	65
Б. Управляемые выпрямители.....	70
§ 2.6. Основные соотношения переменных состояния и угловых и расчетных величин, номограммы.....	70

	Стр.
§ 2.7. Основные особенности работы управляемых выпрямителей класса RL УВ.....	74
Выводы.....	81
<u>Глава III.</u> Параметрические состояния многофазных схем с активными потерями, активной и индуктивной нагрузкой, при учете характеристики вентиля (режимы от холостого хода до короткого замыкания).....	83
§ 3.1. Схема замещения, ее анализ, получение исходной и других переменных.....	84
§ 3.2. Получение расчетных величин, параметрические, нагрузочные, текущие относительные и внешние характеристики, обратное напряжение, номограммы и предельные режимы (х.х. и к.з.).....	91
§ 3.3. Основные особенности работы схем класса $\approx RE_s$..	106
§ 3.4. Этапы инженерной методики расчета схем класса $\approx RE_s$..	111
§ 3.5. О работе управляемых выпрямителей при учете активных потерь.....	115
§ 3.6. Исследование коммутационных состояний k -го порядка m -фазных схем с активными потерями и нагрузкой индуктивного характера (режимы от х.х. до к.з.).....	119
§ 3.7. Результаты анализа коммутационных состояний k -го порядка m -фазных схем при учете активно-индуктивных внутренних сопротивлений и схем с конечной катодной индуктивностью.....	128
Выводы.....	152

<u>Глава IV.</u> Условия существования основных параметрических состояний многофазных выпрямителей и их графо-аналитическая реализация.....	134
§ 4.1. Об условиях существования основных состояний многофазных выпрямителей.....	134
§ 4.2. Графо-аналитическая реализация условий критичности состояний m -фазных выпрямителей различных классов и оперативная оценка их типа режима.....	140
Выводы.....	161
<u>Глава V.</u> Эксперимент.	
§ 5.1. Цель и общая схема эксперимента.....	165
§ 5.2. Исследование параметрических состояний схем с пренебрежимо малыми потерями.....	167
§ 5.3. Исследование параметрических состояний схем с активными потерями.....	173
§ 5.4. Исследование критичности параметрических состояний многофазных выпрямителей.....	184
Заключение (общие выводы).....	191
Приложение	193
Литература.....	205

В В Е Д Е Н И Е

Маломощные потребители постоянного тока имеются практически во всех отраслях народного хозяйства. Трудно найти область, где бы не использовалась радиоаппаратура или другие устройства, построенные на полупроводниковых элементах. Полупроводники требуют сравнительно низкого напряжения питания, а маломощная аппаратура самого различного назначения требует разработки источников вторичного электропитания. Поэтому выпрямители, как неотъемлемая часть и одни из основных и наиболее ответственных узлов радиоаппаратуры, устройств связи, электронных приборов и других аппаратов, находят чрезвычайно широкое применение в самых разных отраслях техники.

Особое значение за последнее время приобрела микроэлектроника. Твердотельные схемы, схемы на туннельных диодах и другие обусловили необходимость получения ультранизких напряжений питания (до долей вольта). Это потребовало создания новых схем вторичных источников. Их построение по ранее известным схемам, используемым для электропитания аппаратуры на электронных лампах, становится малоэффективным и не удовлетворяет прогрессирующим требованиям, предъявляемым к вновь разрабатываемым аппаратам. В частности, малые вес и габариты аппаратуры, выполняющей основные функции и построенной в микромодульном исполнении, становятся отличающимися от габарито-весовых показателей вторичных источников, предназначенных для ее питания и построенных по обычным схемам.

Практика уже дала ряд интересных разработок, основанных на использовании общих принципов m -фазного выпрямления и новых схем стабилизаторов. К числу новых разработок m -фазных выпрямителей следует отнести схемы, предложенные Танно и Кузнецовым Ю.В. [1+8], и их возможные вариации.

Специфика работы указанных источников привела к выделению их в особую категорию – маломощных источников низких и ультранизких напряжений (сокращенно, источников НН и УНН). Их теория и, как следствие, инженерные методы расчета, необходимые разработчикам, практически отсутствуют в настоящее время. Получение научно обоснованных методов проектирования таких источников способствует обеспечению их надежности и экономичности, сокращению сроков разработки и более качественной эксплуатации.

Исследование их режимов работы, на основе результатов которого разрабатываются методы расчета, имеет важное практическое значение в связи с широким внедрением микромодульной техники в специальные и другие области народного хозяйства. При этом переход в диапазон УНН выдвигает ряд проблем, решение которых имеет научный интерес. Важным для практики является знание о состояниях источников при изменении схемных параметров в широких пределах – о параметрических состояниях.

В диссертации исследуются параметрические состояния m -фазных выпрямителей малой мощности. Задачи решаются в направлении возможных обобщений, создания методов общего анализа и инженерных методик проектирования.

Состояние вопроса и цель работы

Специфичным для m -фазных схем малой мощности является пренебрежимо малое влияние индуктивных и необходимость учета влияния активных сопротивлений трансформатора, вентилях, коммутирующих проводников, соединительных разъемов, корректирующих, гасящих и других элементов, называемых внутренними сопротивлениями. Они становятся соизмеримыми, а нередко и преобладающими по отношению к сопротивлению нагрузки в случаях питания потребителя с малым сопротивлением.

При работе на повышенных частотах, а также в области средних мощностей потребителя сказывается влияние и индуктивных внутренних сопротивлений. Его учет необходим также в случаях специальной установки анодных дросселей.

При исследовании выпрямителей ИНН возникает задача по учету влияния начального участка характеристики вентиля на энергетические показатели устройства, что выдвигает проблему ее приемлемой аппроксимации. В известных работах по m -фазным выпрямителям такое влияние практически не учитывается, поэтому решение этого вопроса в связи с новизной сопряжено с определенными трудностями и имеет научный и практический интерес.

Влияние внутренних сопротивлений приводит к тому, что реализованные маломощные m -фазные схемы, находясь в обычных эксплуатационных условиях, работают в так называемых глубоких, k -го порядка коммутационных режимах, когда в отдельные промежутки времени в работе одновременно участвует большое число внутренних ветвей (фаз трансформатора, вентиля и пр.). Существовало мнение, что явление коммутации (перекрытие) ветвей возможно лишь за счет энергии, запасенной во внутренних индуктивностях. В работах проф. Б.П.Терентьева, В.Н.Аксенова, И.И.Белопольского и других [10÷ 21] показано, что коммутация ветвей возможна и за счет лишь одних активных внутренних сопротивлений. Теоретические аспекты этого вопроса требуют более полной проработки и конкретизации практических приложений

Электромагнитные процессы, обусловленные явлением коммутации, отличаются однако значительной сложностью. Даже для первого ($K=1$) коммутационного режима, когда в работе попеременно участвует то две, то одна внутренняя ветвь, не всегда удается простым путем получить необходимые результаты. Это выполняется, как правило, для простых схем замещения выпрямителя при конкретных и простейших видах нагруз-

ки. Для нагрузки общего вида результаты не получены, хотя при рассмотрении процессов в выпрямителе, например, с многозвенным фильтром или разветвленной цепью, эквивалентно представляющей стабилизатор как нагрузку выпрямителя, это имеет важное теоретическое и практическое значение.

В мощных выпрямителях, где при анализе многофазных схем учитывают лишь индуктивные внутренние сопротивления, о коммутационных режимах известно многое, их исследованию посвящено большое число работ в которых создана довольно фундаментальная теория [10+38, 61+64, 103, 140, 161+163, 167, 178]. Однако, по коммутационным состояниям m -фазных выпрямителей малой мощности, когда необходимо учитывать влияние активных внутренних сопротивлений, достаточно строгие и полные результаты до сих пор отсутствуют. Их режимы работы оказались вне рамок систематизированных исследований. Возможно это обусловлено сравнительно недавним появлением новых схем, сложностью физических процессов и, как следствие, отсутствием публикаций, посвященных явлению коммутации многих внутренних ветвей, вызванному лишь активными сопротивлениями. Наметилось отставание теории от бурно развивающейся практики.

Таким образом, разработка методов анализа и расчета m -фазных схем малой мощности, достоверное вскрытие физической сущности происходящих в них коммутационных явлений и их математически корректное исследование является принципиально важной и практически насущной задачей.

Некоторые результаты по первому ($K=1$) коммутационному состоянию схем с активными потерями при активной и индуктивной (при $L \rightarrow \infty$) нагрузках можно найти в работах, посвященных общетеоретическим вопросам электропитания радиоаппаратуры и устройств связи [11+21, 145]. В связи с новыми задачами, выдвинутыми практикой, возникает необхо-

димось более глубокой разработки теории для случая работы с конечной катодной индуктивностью и распространения на коммутационные режимы k -го порядка.

Получение таких результатов выдвигает задачу по изучению состояний устройства при изменении параметров схем в широком диапазоне, т.е. по изучению параметрических состояний. На практике важно, например, иметь информацию о поведении схемы при изменении сопротивления нагрузки от холостого хода до короткого замыкания (от ∞ до 0). Такое изменение вызывает, однако, переход из одних в качественно другие режимы с количественно иными энергетическими показателями. Каждый режим требует своего математического отражения, новых решений и получения новых результатов. Поэтому обычно изучают либо одно какое-то состояние выпрямителя при его m -фазном представлении (например, режим прерывистых выходных токов [10+14, 16+21, 39+49, 144, 146] или первый коммутационный режим [10+21, 30, 34, 48, 49, 144, 146]), либо исследуют все состояния, но для одной конкретной схемы - однофазная [27, 50+56], однофазная мостовая [30, 32, 35, 58, 59, 121, 123+125, 128, 136+146], двухфазная [27, 30, 35, 51+57], 3-фазная мостовая [30, 35, 61, 62, 132, 167, 178, 183], 6-фазная с уравнительным реактором [28, 30], 12, 18, 24-фазные схемы [30, 35, 63, 64]. Представляет несомненный научный интерес объединить оба приема, найти путь решения такой задачи и получить результаты для общего случая - для всех возможных состояний любой m -фазной схемы изучаемых в диссертации классов выпрямителей.

Однако, полное исследование каждого режима в отдельности (как это обычно и выполняется) связано со значительной трудоемкостью и приводит к громоздким, а в ряде случаев трудно физически обозримым аналитическим результатам. При этом с ростом числа фаз число режимов и, значит, объем исследования резко увеличивается. Так, если

двухфазная схема с потерями может работать в трех режимах, то например, 18-фазная однотактная параллельная схема [64] может работать в 25 режимах. При доведении результатов до расчетных соотношений и номограмм, необходимых в инженерной практике, трудоемкость работы и объем материала еще более возрастают. Это вынуждает посвящать отдельным конкретным (при данном m) схемам не только специальные статьи, но и более капитальные труды, какими являются научные отчеты, монографии и диссертации. Весьма актуальной поэтому является задача по изысканию приема и получению результатов в общем виде, пригодных для любого k -го режима любой m -фазной схемы. Научное значение такого обобщения и потребность практики в общих методах исследования и инженерных методах проектирования схем, работающих в глубоких коммутационных режимах, побудили автора попытаться решить эту задачу применительно к m -фазным выпрямителям малой мощности.

Первая и единственная попытка построить и решить в общем виде систему уравнений для выпрямителей с любым числом фаз и любого коммутационного режима была предпринята еще в 1924 г. одним из основоположников общей теории преобразования энергии М.Демонтовинье [23]. Рассматривался случай работы на противоэдс при учете внутренних и катодной индуктивностей. Активные сопротивления не учитывались. Но и при таком упрощающем условии М.Демонтовинье решил уравнения лишь принципиально, но не получил все необходимые при проектировании схем соотношения, не довел результаты до расчетных номограмм и не разработал инженерной методики расчета схем. Однако, при современных представлениях и в первую очередь для производственной практики это имеет первостепенное значение. "Что касается омического сопротивления, - подчеркнул в своей работе М.Демонтовинье, - то его присутствие вводит в расчет непреодолимые затруднения". Возможно поэтому после него, несмотря на значительный промежуток времени, не

появилось работ подобного плана при учете активных сопротивлений внутренних цепей и нагрузки. Между тем для выпрямителей малой мощности, используемых для питания радиотехнической и, в частности, микроэлектронной аппаратуры, характерным является, как указывалось выше, существенное влияние на процессы именно активных внутренних сопротивлений и обязательным - наличие активных сопротивлений нагрузки. Полагая задачу по их учету актуальной, в диссертации сделана попытка изложить часть результатов, полученных автором при исследованиях переходных временных и параметрических состояний маломощных m -фазных схем с нагрузкой общего, активного, индуктивного и емкостного характера.

Как подчеркнуто в классической монографии акад. М.П.Костенко, Л.Р.Неймана и Г.Н.Блаудзевича [28], посвященной шестифазной схеме с уравнительной катушкой Кюблера, условие идеального постоянства выпрямленного тока ($L \rightarrow \infty$), обычно допускаемое для упрощения анализа, не позволяет оценить действительную роль катодного реактора. Оно искажает истинную физику процессов, не позволяя осуществить общий анализ схемы. Переходные временные процессы и величину пульсаций тока полезной нагрузки в стационарных режимах исследовать при этом принципиально невозможно. Поэтому важным является рассмотрение состояний схем при бесконечных и конечных значениях реактивностей.

Отметим, что при анализе схем с бесконечной реактивностью возникает трудность принципиального характера, заключающаяся в следующем. Выходную величину (ток - при индуктивной и напряжение - при емкостной нагрузке) в этом случае полагают постоянной. Поэтому два из уравнений методики "припасовывания" становятся тождественными, и при определении неизвестных начальных условий и угловых величин не достает одного уравнения. Тем самым не удается получить в явном виде связь угловых и схемных параметров. Поэтому при рассмотрении,

например, класса схем с активно-индуктивными сопротивлениями внутренних ветвей и в цепи нагрузки вынуждены прибегать к искусственным приемам [48, 49, 152]. В работе [48] задача анализа не решена до конца (искомые углы выражены через средний ток нагрузки, который в свою очередь является функцией схемных параметров, не найденной в работе). Ценным достоинством работ [49, 152], несмотря на ряд приемов, несколько искажающих при принятых предпосылках физику процессов, но упрощающих промежуточные выкладки, является доведение результатов до расчетных номограмм, что способствует выполнению задачи синтеза.

Поскольку отмеченная выше трудность носит общий характер, то целесообразно на примере того же класса, охватывающего выпрямители малой (при работе на повышенных частотах) и средней мощности, найти в явном виде связь определяющих параметров и на ее основе получить более строгие результаты.

Если m -фазные схемы с активными потерями и индуктивной нагрузкой (при бесконечной и, тем более, конечной индуктивности) достаточно полному исследованию практически не подвергались, то в случае емкостной нагрузки положений ^{обратное} [10+14, 16+21, 27, 39+46, 51+56, 65, 144+146].

Во всех этих работах влияние начального участка характеристики вентиля не учитывалось, что в свете новых задач (источники УНН) напротив имеет принципиальное значение. Коммутационные режимы не затрагивались.

Поэтому весьма актуальным является полное исследование коммутационных состояний схем с индуктивной и емкостной нагрузках при учете характеристики вентиля и, в частности, определение условий перехода из режима прерывистых токов в коммутационные режимы - условий критичности состояний.

Решение таких задач невозможно без предварительного определения физического состояния схемы при принятых исходных предпосылках и заданных соотношениях схемных элементов. Поэтому определение типа режима считается в настоящее время специальной проблемой принципиально важного значения [66, 115]. Найти приемы, хотя бы в какой-то мере облегчающие задачу исследователя, значит способствовать решению этой проблемы.

При исследованиях важны также вопросы: 1. выбор и уменьшение числа обобщенных, независимых при сохранении числа реальных, схемных параметров, 2. выбор масштаба графических иллюстраций и расчетных номограмм при изменении определяющих аргументов от 0 до ∞ 3. выбор оптимальной (в смысле удобства анализа и практической приемлемости) аппроксимации характеристики вентиля.

В диссертации поставлена цель предложить методы анализа и осуществить полное и систематизированное исследование параметрических состояний неуправляемых и, частично, управляемых m -фазных схем без потерь и с активными потерями, при учете характеристики вентиля и работе в режимах от холостого хода до короткого замыкания, включая коммутационные режимы k -го порядка, а также разработать инженерные методы расчета и сформулировать условия существования основных состояний схем.

Первая глава посвящена некоторым исходным положениям, общим для последующего содержания работы, в числе которых применительно к m -фазным выпрямителям рассматриваются предложенные приемы исследования и одна из модификаций формулы разложения, известной в теории линейных цепей при использовании операционного преобразования Лапласа.

Во второй главе подробно исследуются параметрические состояния m -фазных схем без потерь с комплексной нагрузкой индуктивного ха-

рактера при работе в чисто выпрямительном и управляемом режимах, а также режимах от холостого хода до короткого замыкания и при изменении индуктивности от 0 до ∞ .

Коммутационные состояния k -го порядка m -фазных схем с активными потерями, нагрузкой активного и индуктивного характера, при учете напряжения смещения вентиля, отображающего влияние начального участка его характеристики, и работе в режимах от холостого хода до короткого замыкания детально исследуются в третьей главе. Приводятся также результаты, полученные в явном виде при учете внутренних активных и индуктивных сопротивлений.

Попыткам получить некоторые общие условия существования основных параметрических состояний m -фазных выпрямителей и их конкретной графо-аналитической реализации для значительного числа классов схем малой, средней и большой мощности посвящена четвертая глава.

В пятой главе приведены результаты эксперимента и дана оценка погрешностей упрощенных методов расчета в сравнении с точными результатами.

В заключении подведены основные итоги работы.

Приложение содержит номограммы и вывод формулы разложения для случая произведения многих мероморфных функций.