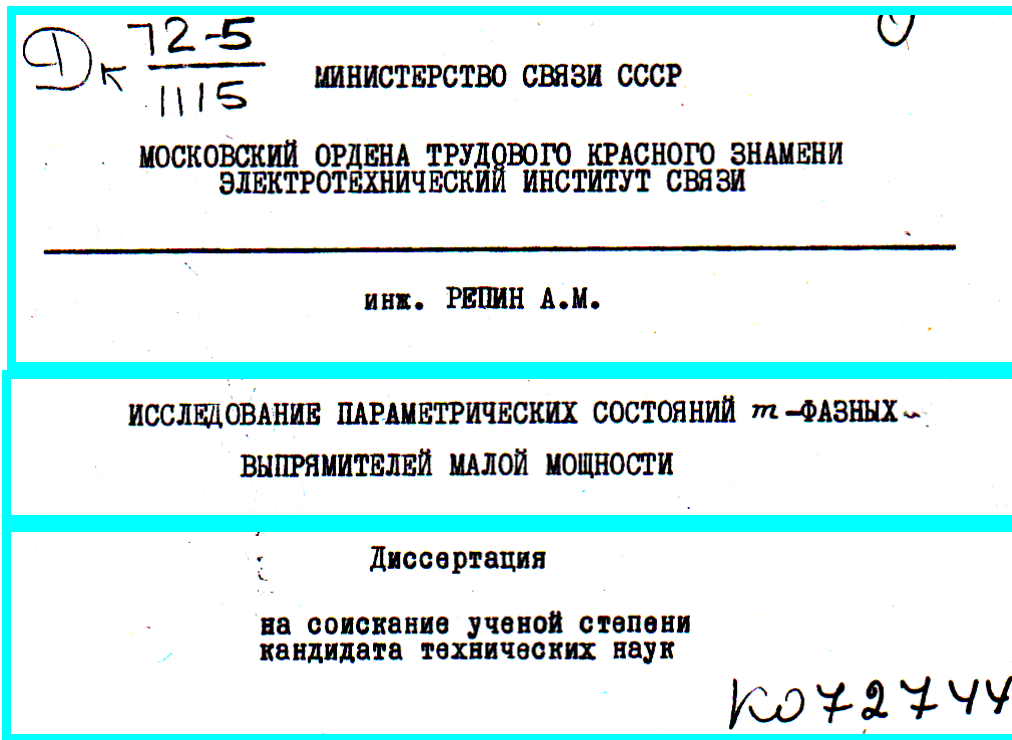


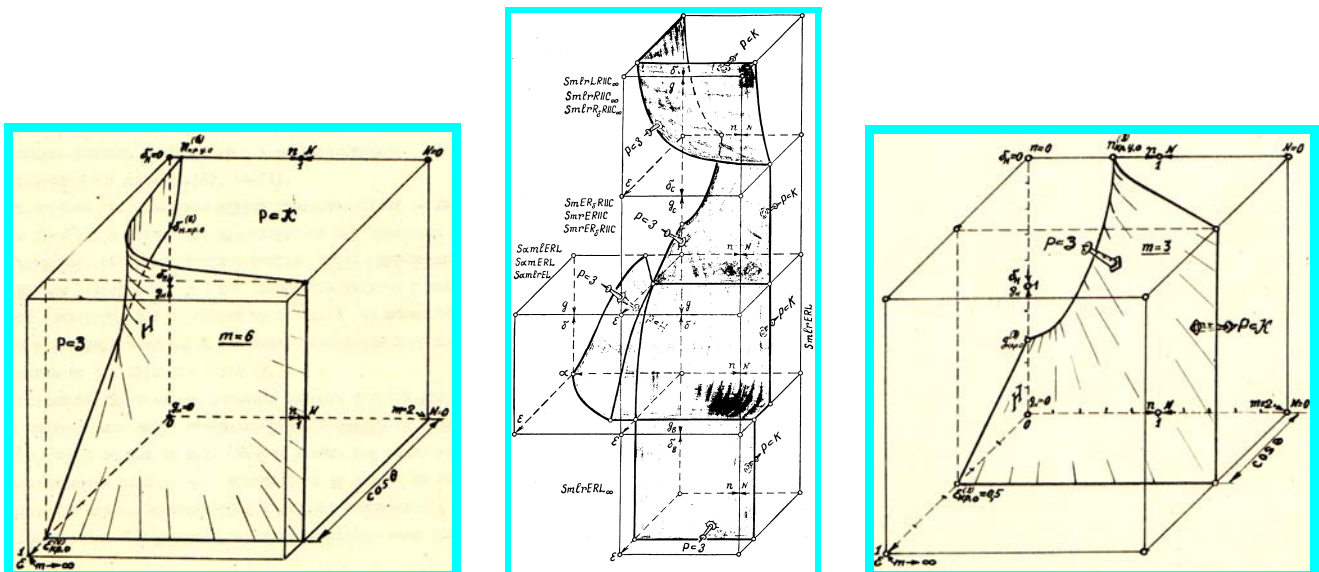
А.М. Репин. Исследование параметрических состояний  $m$ -фазных выпрямителей (ПСВ).  
*Arkadiy M. Repin. Research of parametric conditions of the  $m$ -phase rectifiers (PCR).*  
 /The PhD thesis. 1971–26.9.2015. Гл. 4. с. 134–143.

**Анонс.** В публикуемой впервые в электронной версии главе 4 кандидатской диссертации автора, основанной на предшествующих по времени материалах автора (рукописей, отчётов, докладов, публикаций), был впервые открыт в 1971 году доступ для более широкой аудитории специалистов, по сути, к **НОВОЙ** тематике в области базовых схем **вентильных конвертеров** электроэнергии (**БВК ЭЭ**).

Автореферат (с. 1–22) и Предисловие, Главы 1–3, стр. 1–133 Кан. Дис. См. в [//econf.rae.ru/article/6861](http://econf.rae.ru/article/6861).  
 ..6862. ..9500–9507. ..9512–9514. ..9521–9515. Именно так. В обратном порядке. Почему? Вопросы к редактору. Не к автору. Далее – стр. 134–164 Главы 4. К сожалению, по очень маленьким частям. В связи с ограничением электронного объёма на один файл публикации. При одновременно значительном реальном объёме (5, ..., 10, ..., 25 Mb) на одно изображение при сканировании исходного материала (оригинала). В нашем случае – одной страницы. Объём можно снизить. Набрал в Word'e заново. Что для автора уже не реально. Да и важен оригинал. Или за счёт ухудшения качества. Что заметно в файлах выше. И далее.



Москва – 1971



Пространственные автономные и блочная режимные конструкции БВК ЭЭ различных классов.

## ГЛАВА IV

### УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОСНОВНЫХ СОСТОЯНИЙ МНОГОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ИХ ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

*§ 4-1. Об условиях существования основных состояний многофазных выпрямителей.*

В предыдущих главах было показано, что при исследовании конкретного класса схем возникает прежде всего вопрос о том, в каком состоянии эта схема находится, каковы физические процессы, в ней протекающие. Установление типа режима считают специальной проблемой [66, 130]. При использовании методики принасовывания в настоящее время не существует общего и доступного способа, позволяющего однозначно определить режим, даже для простого случая, когда цепь содержит только один нелинейный элемент с характеристикой, аппроксимированной небольшим (2-3) числом линейных отрезков. Поэтому даже в случае одно-вентильной цепи прибегают к специальному исследованию, хотя и это не всегда приводит к положительным результатам, не считая простейших случаев.

В многовентильной схеме, представителем которой является многофазный выпрямитель, физические процессы ещё более сложны, и исследование внешне несложной по конфигурации схемы замещения является, как правило, самостоятельной задачей [22, 23, 28, 34, 40-49, 167, 178]. При этом состояние схемы или тип режима определяют при конкретных соотношениях параметров входящих в нее элементов, изменение которых приводит к изменению типа режима даже в одной и той же схеме. Нередко эти соотношения не оговаривают, что приводит к ошибочному толкованию процессов и результатов проводимого анализа.

Только после вскрытия физики состояния схемы осуществляют его аналитическое решение — составляют уравнения этого состояния, определяют его переменные, находят расчётные величины, получают расчётные номограммы, разрабатывают инженерную методику расчёта.

При определённых навыках и соответствующем уровне математики—

ческих знаний задача аналитического исследования значительного числа классов схем решается относительно просто в принципиальном отношении. Такое решение требует лишь существенных затрат времени и труда, а также машинного обеспечения (ЭВМ).

Итак, выяснение физики процессов, протекающих в вентильной схеме, т.е. определение её состояния является важным этапом исследования и в настоящее время проблемным моментом в теории преобразования.

Применительно к многофазным схемам выпрямления выше были приведены определения основным состояниям этих схем, обозначенным для краткости как  $P < Z$ ,  $P < K$ ,  $P < H$ , а также состояниям, названным критическими. Возникает естественно вопрос, при каких конкретных условиях могут существовать указанные состояния и как ими пользоваться на практике.

Ниже сделана попытка определить некоторые из таких условий на основе физических соображений и результатов предыдущих глав.

Из сравнения приведенных в первой главе определений основных состояний многофазных схем и результатов 2ой главы можно заметить, что для состояния вида  $P < H$  характерным является отсутствие внутри интервала повторяемости таких подинтервалов, когда все вентили были бы закрыты, либо в работе участвовало бы одновременно более одной внутренней независимой ветви. Этот необходимый и достаточный признак состояния  $P < H$  сокращенно может быть записан в виде

$$H = \bar{Z} \times \bar{K} . \quad (4.1)$$

Лишь для удобства записи мы воспользовались обозначениями, известными из булевой алгебры. Знаки  $\times$ ,  $\vee$  и черта над символом здесь и далее означают соответственно *и*, *или*, *не*.

Опыт исследования многофазных схем показывает, что состояние  $P < H$  может существовать лишь при условии, если внутренние активные  $Z$  и индуктивные  $X$  сопротивления не учитываются. Тогда в более

конкретной, чем ( 4.1 ), форме необходимое условие существования  $P \subset H$  можно представить в виде

$$H \leftarrow \varepsilon x x = 0 . \quad ( 4.2 )$$

Физически это условие ясно, поскольку только при пренебрежении внутренними сопротивлениями на них нет падений напряжения ( в индуктивностях - нет запаса энергии ), обуславливающих возможность одновременной работы ветвей ( коммутацию ). Только в этом случае потенциал фэдс ветви, где вентиль открыт, является потенциалом катодов остальных ( закрытых ) вентилях. Если, кроме того, отсутствуют причины, вызывающие состояние  $P \subset Z$ , то выходное напряжение представляет собой огибающую фазовых эдс, и каждая ветвь ( фаза, вентиль ) вступает в работу только в момент равенства положительных значений этих эдс ( по огибающей ). На диаграмме фазовых эдс этот момент соответствует так называемому " нулевому " их пересечению ( т.е. с " нулевой " начальной фазой, которая для полносимметричных эдс равна  $\psi_0 = \pi/2 - \theta$  ). Например, в многофазной схеме без потерь при работе на активно-индуктивную нагрузку ( см. гл. II ) всегда имеет место состояние  $P \subset H$  независимо от соотношения параметров схемы и исследуемых в ней процессов ( переходных или установившихся, временных или параметрических ).

Исходя из рассуждений, подобных предыдущим, необходимое условие состояния  $P \subset K$  может быть записано в виде

$$K \leftarrow \varepsilon r x \neq 0 . \quad ( 4.3 )$$

В словесной форме эта запись означает, что коммутационные состояния в многофазной схеме возможны лишь при учёте хотя бы одного вида внутренних сопротивлений ( активных или индуктивных ).

За счёт падений напряжения на внутренних сопротивлениях мгновенные значения напряжения  $U_H$  на нагрузке схемы будут либо во всём интервале повторяемости, либо на отдельных его подинтервалах меньше значений огибающей фазовых эдс, что и может привести к ком-

мутации (перекрытию) ветвей. Это физически понятное обстоятельство можно выразить аналитически лишь при конкретных условиях.

Если учитываются только активные внутренние сопротивления (что в зависимости от вида нагрузки и учёта напряжения смещения охватывает значительное число классов маломощных схем), <sup>широко используемых, в частности, в микроэлектронике</sup> достаточным условием состояния  $P \subset K$  будет выполнение неравенства

$$K \leftarrow U_H(\psi_0) \leq \xi(\psi_0), \quad (4.4)$$

$$(HK \subset \xi_1 = 0, \xi_1' > 0; \xi_1(\psi_{01}) \geq \xi_M(\psi_{0M}). \quad (4.4')$$

Аналогично для ряда широко распространённых схем условие существования  $P \subset Z$  при том же (4.4') запишем в виде

$$Z \leftarrow U_H(\psi) \geq \xi(\psi_0), \quad (4.5)$$

$$x \vee z \subset y \neq 0. \quad (4.6)$$

Расшифровка (4.4') является произвольной, она определяет выбор начала координат и, значит, аргумент условий (4.4) и (4.5). Условие (4.6) показывает, что состояние  $P \subset Z$  может иметь место как при учёте реальных внутренних сопротивлений, так и в идеализированных или бестрансформаторных с идеальными вентилями схемах.

Очевидным следствием состояния схемы при закрытых вентилях, которое может рассматриваться и как иной признак  $P \subset Z$ , является наличие интервалов или пауз нулевых значений выходного тока <sup>( $i_H$ )</sup>. Это означает, что состояние  $P \subset Z$  отражает так называемый режим прерывистых выходных токов. Следовательно, интерпретируя (4.5), имеем при той же произвольно выбираемой расшифровке (4.4') и том же не-критичном условии (4.6)

$$Z \leftarrow i_H(\psi + \lambda) = 0. \quad (4.7)$$

Условие (4.7) является достаточным и поэтому может считаться более общим по охвату числа схем, чем (4.5). Аналогично

$$K \leftarrow i_H(\psi + \lambda) \neq 0. \quad (4.8)$$

Понятно, что встречная эдс способствует, а согласная эдс препятствует состоянию  $P \subset Z$  и наоборот - по отношению к состоянию  $P \subset K$ . Следовательно, наличие индуктивностей (дроссель фильтра, катодный или анодный реактор, специально включенные согласные эдс и т.п.) способствуют наличию коммутационных режимов. Напротив, учёт напряжения смещения (т.е. в источниках низких и особенно в источниках инфранизких напряжений независимо от эквивалентной структуры схемы), а также наличие активных пэдс (например, зарядка аккумуляторов, работа на двигатель постоянного тока) или наличие конденсаторов (например, ёмкостные фильтры) способствуют режимам прерывистого выходного тока. Если обозначить эти факторы через  $\vec{\xi}$ , необходимое условие состояний  $P \subset Z$  можно кратко записать в виде

$$Z \leftarrow \vec{\xi} \neq 0. \quad (4.9)$$

Приведенные условия способствуют качественной оценке возможного состояния схемы, предупреждая ещё до начала аналитического исследования получение математических результатов, вероятных ложными физическими выводами.

Знак равенства в (4.4) и (4.5) определяет переход схемы из одного состояния в другое и, значит, согласно определению критического состояния даёт критическое значение напряжения нагрузки

$$U_{н.кр} = \xi(\psi_0), \quad (HK \subset \xi = 0, \xi' > 0). \quad (4.10)$$

При полной симметрии фэдс и смене начала координат выражение (4.10) принимает вид

$$U_{н.кр} = \xi(\theta), \quad (HK \subset \xi_\alpha) \quad (4.10')$$

для весьма распространённого, когда форму фазных эдс полагают синусоидальной, откуда для случая,  $(\xi = S = \cos \theta)$ , получаем

$$U_{н.кр(0)} = \cos \theta. \quad (4.11)$$

При выполнении условия (4.3) формулы (4.10+4.11) определяют переход от режима  $P \subset Z$  в режим  $P \subset K$  или наоборот. При выполнении условия (4.2) - переход из состояния  $P \subset H$  в состояние  $P \subset Z$  или на-

наоборот. Одним из характерных признаков критических состояний схем, который может трактоваться как необходимое условие критичности, является равенство

$$\lambda_{min} = 2\theta, \quad (4.12)$$

охватывающее практически все (при допусках в настоящее время условиях) исследуемые классы схем.

При полностью симметричных фэдс имеем

$$\lambda = 2\theta, \quad \lambda = \theta. \quad (4.13)$$

Последнее равенство характерно, например, для ординатно-симметричных процессов, имеющих место в безреактивных  $X$  схемах при либо при наличии реактивных элементов, но при дополнительных условиях. Например, при равности емкостей первого элемента фильтра.

На основе комбинации выражений (4.7) и (4.13) возможна дальнейшая конкретизация условия критичности, охватывающего значительное число классов выпрямителей

$$i_n(\lambda)_{\lambda=2\theta} = 0, \quad (HK < \psi). \quad (4.14)$$

Ясно, что указанные условия определяют нулевую критичность состояний. Критичность  $k$ -го порядка в общем случае обусловлена равенством напряжения нагрузки в  $k$ -м подинтервале коммутации значению очередной фэдс, которая в докритическом режиме работала в  $k$ -м подинтервале, т. е.

$$U_{н.кр}(\gamma_{кр.k}) = S_m(\gamma_{кр.k}), \quad (4.15)$$

что для схем с активными потерями с очевидностью даёт

$$\gamma_{кр.k} = 2\theta; \quad \gamma_{кр.k} = \theta. \quad (4.15')$$

Приведенные условия критичности или их возможная интерпретация способствуют выяснению границ справедливости известных и вновь создаваемых теорий работы различных классов схем многофазных вентильных преобразователей и в ряде случаев позволяют формализовать аналитическое решение их физических состояний, что способствует формализовать анализ и проектирование вентильных конвертеров электроэнергии.

В заключение отметим, что полученные результаты относятся к случаю, когда трансформатор представлен как источник эдс. В случае представления его в виде источника тока результаты будут, очевидно, идентичными в силу дуальности цепей.

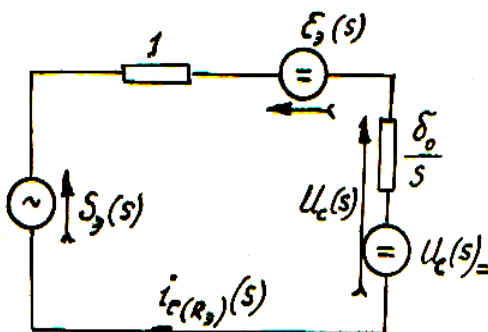
**§ 4.2. Графо-аналитическая реализация условий критичности состояний  $m$ -фазных выпрямителей различных классов и оперативная оценка их типа режима**

На примере некоторых типовых классов схем найдём конкретные критические связи определяющих параметров, одновременно решив ряд задач принципиального характера и проиллюстрировав прикладное значение приведенных выше общих условий критичности [69].

**1. Класс  $\approx E_s R / C$ .**

Многовентильная цепь такого класса, учитывающая смещенную двухлинейную характеристику вентиля (рис. 3.1, а), активные потери в схеме и конечное значение ёмкости параллельного  $RC$ -фильтра, в интервале проводимости вентиля и при условии полной симметрии внутренних независимых ветвей, в режиме  $P < 3$  может быть с использованием теоремы Тевенена представлена в виде последовательного соединения активного сопротивления, ёмкости, источника эдс и противо-эдс, отображающей напряжение смещения вентиля.

В этом элементарном в математическом отношении случае реакция



цепи на непрерывные воздействия определяется просто, поскольку поведение этой цепи при ненулевых начальных условиях описывается эквивалентным операторным (алгебраическим) уравнением всего лишь первого порядка. Схема ОПЭ представлена на рис. 4.1.

Рис. 4.1. ОПЭ  $\approx E_s R / C$ .

Решение такой цепи (или её уравнения) принципиальных трудностей не составляет и, пользуясь, например, формулой (1.10), может быть представлено в виде суммы трёх составляющих относительно напряжения на ёмкости, выбираемого в силу его риджитности - в качестве исходной



переменной,

$$U_c(\vartheta) = U_c(\vartheta)_{o(s)} + U_c(\vartheta)_{o(\varepsilon)} + U_c(\vartheta)_{=} \quad (4.16)$$

Составляющую  $U_c(\vartheta)_{=}$  от начального заряда ёмкости находим, например, по формуле (1.10') или, что проще, пользуясь готовым (табличным) соответствием. Начальное напряжение  $U_c(0)$  определяем из условия  $U_H(0) = S(0)$ , что даёт  $U_c(0) = \sin\psi - \varepsilon$ , ( $\psi = S = 0, S' > 0$ ). Составляющая  $U_c(\vartheta)_{o(\varepsilon)}$  от пэдс  $\varepsilon$  идентична выражению (1.19) и находится из (1.17), либо по готовому соответствию. Реакция  $U_c(\vartheta)_{o(s)}$  от фэдс - по формуле (1.16). Её проще можно найти, воспользовавшись формулой (1.18) и учитывая соответствующий масштабный коэффициент по амплитуде и фазе дуальных переменных, применяя теорему смещения для приведения к новому началу координат и принцип подобия, записываемый нами для сравниваемых переменных в виде

$$U_c \rightleftharpoons i_L; i_L \rightleftharpoons U_L; \varphi_c = \pi/2 - \varphi_L; \varphi_L = \pi/2 - \varphi_c \quad (4.17)$$

Окончательно имеем

$$U_c(\vartheta) = U_{cy}(\vartheta)_{o(s)} + U_{cy}(\vartheta)_{o(\varepsilon)} + U_{cn}(\vartheta)_{o(s)} + U_{cn}(\vartheta)_{o(\varepsilon)} + U_{cn}(\vartheta)_{=} = U_{cy}(\vartheta) + U_{cn}(\vartheta) \quad (4.18)$$

где при  $\xi \in S; HK \in \psi$ :

$$U_{cy}(\vartheta) = -\frac{1}{1+n} [\sin\beta \cos(\vartheta + \psi + \beta) + \varepsilon]; U_{cn}(\vartheta) = \frac{1}{1+n} e_a e^{-\delta_o \vartheta} \quad (4.18')$$

$$e_a = \cos^2\beta \sin(\psi + \beta) + n(\sin\psi - \varepsilon), \quad (4.18'')$$

$\delta_o = g_o^{-1} = \text{tg}\beta = (1+n)\delta_H = (1+n)\text{tg}\varphi_c = (1+n)\omega RC$  - обобщённый декремент цепи независимого контура в нулевом подинтервале коммутации (иначе - во внекоммутационном подинтервале), выраженный через собственный декремент цепи нагрузки  $\delta_H$ .

Попутно полученное при этом соответствие вида

$$\frac{S_\psi(s)}{s + \text{tg}\beta} = \cos\beta [-\cos(\vartheta + \psi + \beta) + \cos(\psi + \beta) e^{-\vartheta \text{tg}\beta}] \quad (4.19)$$

можно рассматривать как табличное.