

Анонс: Впервые в электронном виде приведены скан-копии уникальных по информационной ёмкости результатов фундаментальных физико-математических исследований по проблеме критичности состояний вентиляльных преобразователей электроэнергии. Изучено около 130 классов схем. Даны: понятие «класс схем» /схемных моделей, обозначения их и режимов работы, математически замкнутые, рекуррентные уравнения связи схемных параметров, классификация моделей и режимов, алгоритмы оценки типа режимов и режимные портреты (режимные конструкции, плоские и объёмные). ↓ Это часы автора. Во время сканирования статьи случайно оставили свой вид. На память. "Для истории".



*Дил. н. Э. 3.*  
*17.12.80*  
АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИЗВЕСТИЯ  
АКАДЕМИИ НАУК СССР

ЭНЕРГЕТИКА И ТРАНСПОРТ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

4

*Проблема*  
*Критичности*  
*состояний ВП*

МОСКВА · 1980

*(около 130 классов*  
*схем)*

- 1) Замкнутые (рекуррентные) Ур-я*
- 2) Классификация моделей*
- 3) Алгоритмы оценки режимов*
- 4) Режимные портреты (конструкции)*
- 5) Объёмные схемы, режимы, портреты "классов" схем*

УДК 621.314.1:621.382

**КРИТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**А. М. РЕПИН**

*(Москва)*

На единой физико-математической, методической и терминологической основе даны в унифицированном виде замкнутые уравнения связи критических параметров вентильных структур различных классов. Разработаны режимные конструкции и алгоритмы по оперативной оценке типа режимов, отличающиеся практическим удобством и простотой. Илл. 3, табл. 2. Библ. 26. Стр. 71–94.

**Введение.** Повышение качества и эффективности проектирования и эксплуатации вентильных преобразователей энергии (ВП) — важная народнохозяйственная задача. Обусловлено это прежде всего тем, что без управляемых и неуправляемых ВП в настоящее время невозможно нормальное функционирование ни одной радиоэлектронной или какой-либо иной современной аппаратуры самого различного назначения, в том числе наземной и бортовой аппаратуры космических радиокомплексов, средств связи и приборостроения, аппаратурно-измерительного сервиса ядерных исследований, вычислительной техники, электропривода и электролиза, передачи постоянного тока и железнодорожного транспорта и т. д.

Среди возникших здесь направлений актуальной является проблема по оперативной оценке типа режимов конкретных схемных структур ВП. Эта задача, от решения которой в значительной мере зависит уровень эффективности и качества, непосредственно связана с проблемой определения критичности физических состояний ВП. Критическими называют различные неустойчивые состояния схем, соответствующие переходу из одного режима в другой.

Главной причиной, вынуждающей обращаться к решению данной проблемы, является то обстоятельство, что вентильные преобразователи даже одной и той же схемной структуры работают в различных по физическому состоянию режимах. Каждому из них присущи свои режимно-энергетические показатели, предопределяющие в конечном итоге массогабаритные, надежность и стоимостные характеристики устройств, и, следовательно, их обобщенные технико-экономические показатели. Рассчитанные по соотношениям, полученным при исследованиях одних режимов, результаты анализа и синтеза схем ВП теряют смысл при переходе в другие режимы.

Но актуальность проблемы усиливается еще и другим немаловажным обстоятельством — обширностью конкретных практических задач. К настоящему времени в схемном арсенале ВП накопилось огромное количество различных схемных структур ВП, каждая из которых объединяет в себе множество различных типов схем. В свою очередь каждая схема воплощается обычно в бесчисленном количестве конкретных практических разработок самого различного назначения. Причем число классов, видов, типов схем и их конкретных реализаций непрерывно растет, создавая в связи с масштабностью неограниченную массу задач, требующих неотлож-

ного решения. Все они так или иначе связаны с априорной необходимостью знать, в каком конкретном состоянии находится данная схема.

Опыт показывает, что задача оперативной оценки типа режимов может быть наиболее просто решена в тех случаях, когда удастся каким-либо образом определить параметры схемных элементов, соответствующие критическим состояниям схем.

Именно поэтому проблема определения критичности состояний, являясь весьма актуальной, постоянно привлекает к себе широкое внимание [1-26]. Особенно острой она стала за последнее время [7-26], что вызвано растущим повышением требований к качеству, надежности и эффективности инженерного синтеза вентиляльных устройств и аппаратуры в целом, их миниатюризацией, унификацией и оптимизацией.

В данной работе предпринята попытка решить указанную проблему применительно к неуправляемым и управляемым (в частности, тиристорным) ВП, содержащим на входе  $m$ -фазную симметричную систему синусоидальных и несинусоидальных (полигармонических) э.д.с., соответствующее число вентилялей, соединенных по лучевым или мостовым схемам, различные типы емкостных и индуктивных фильтров и противо-э.д.с. во внутренних ветвях и/или в выходной системе постоянного тока. Задача решена для большого числа конкретных устройств, для чего рассмотрено около 130 различных классов схемных структур ВП, работающих в разных режимах: прерывистого выходного тока, непрерывного, с мгновенной коммутацией внутренних ветвей (фаз трансформаторов, вентилялей и пр.) либо при их «перекрытии», в первом коммутационном режиме, либо в режимах  $k$ -го порядка. Каждый класс схем объединяет определенное множество устройств, схемы замещения которых входят как частные в общую схему данного класса.

**Постановка задачи.** В большинстве известных работ критичность состояний ВП рассматривают обычно в совокупности с другими вопросами, например при построении внешних характеристик [10, 15, 18], определении критических значений среднего тока нагрузки [5, 16, 20], расчетах закритической индуктивности простого индуктивного [6, 9, 16, 21] или Г-образного индуктивно-емкостного [1, 3] фильтров, выявлении гармонического состава выходного тока [9], оценке границ справедливости расчетных соотношений по режимно-энергетическим показателям ВП [2, 4, 14, 15] и т. п.

Между тем проблему критичности целесообразно решать не по отношению к отдельным характеристикам или переменным состояниям ВП (токам, напряжениям и пр.) и не применительно к размерным значениям схемных элементов, создающим на практике ряд неудобств в силу их ограниченной информативности, а значительно полезнее решать ее посредством некоторых унифицированных параметров, представляемых в обобщенном и безразмерном виде. Именно такие параметры *однозначно определяют* любые физические состояния схемных структур ВП (а следовательно, любые их характеристики и режимные показатели), и потому подобные параметры называются в дальнейшем *определяющими* [4, 7, 8, 12-14, 19, 20, 25].

Использование определяющих параметров позволяет абстрагироваться от конкретных значений токов, напряжений, мощностей и при чрезвычайно большом их разнообразии в обобщенном виде охватить любые практические реализации, соответствующие данному классу схем. В связи с этим всякие результаты, выраженные через определяющие параметры, в том числе результаты по критичности, приведенные далее, можно в указанном смысле рассматривать как универсальные.

В обширной электротехнической литературе изучение критичности ВП сосредоточено в основном вокруг ограниченного числа классов схем, рассматриваемых преимущественно в работах по электроприводу [2, 5, 6, 10, 15-18, 21], что совершенно недостаточно. В других отраслях техники, таких, как радиоэлектронная промышленность, приборостроение, связь, вычис-

лительная техника, лазерная техника и др., широко применяют также иные классы вентильных схем. До сих пор критичность их состояний не нашла должного освещения в литературе, что является существенным пробелом.

Кроме того, следствием общей терминологической неупорядоченности, существующей в настоящее время в области ВП, является применение различными авторами самых разнообразных обозначений критических параметров ВП, причем не только для величин, одинаковых по физическому смыслу и относящихся к разным классам ВП, но и для величин одних и тех же классов. Все это затрудняет восприятие и применение результатов как специалистами одной отрасли, так и, в особенности, разных отраслей.

В связи с этим представляется крайне необходимым систематизировать существующее многообразие схемных структур ВП, их режимов работы, а также элементов схем и определяющих их параметров путем введения единообразных понятий, обозначений и признаков. Такие попытки уже были предприняты ранее [7, 8, 12-14, 20, 23-26] и показали значительные удобства и полезность единой символики. Как всякая унифицированная система обозначений, введенная система экономит мышление. В данной работе унифицированная символика распространяется на критические состояния схем и соответствующие им режимные конструкции [7, 8, 13, 25] или режимные портреты [4, 7, 12, 23, 26] всех классов схемных структур ВП, управляемых и неуправляемых.

Следует отметить также, что среди публикаций по ВП встречаются результаты, которые не всегда можно отнести к определенному классу схем [5, 15-18] из-за отсутствия или нечеткости изложения исходных предпосылок. Это приводит порой к неточному их восприятию и использованию. Некоторые из опубликованных соотношений сложны [9] либо даны в математически незамкнутом относительно определяющих параметров виде, что создает неоднозначность. Известны результаты, повторяющие полученные ранее либо содержащие соотношения, не отличающиеся полной ясностью [5, 6, 18]. Встречаются недостаточно правильные данные. По многим классам схем критичность вообще не выяснена.

Цель данной работы:

систематизировать существующее многообразие схемных структур рассматриваемых ВП и их режимов путем введения простых, физически обусловленных признаков;

для каждого класса схем дать уравнения связи критических параметров схемных элементов, представив их в обобщенно-унифицированном и вместе с тем простым и доступном для специалистов различных отраслей виде;

предложить по каждому классу схем простые алгоритмы по оценке типа режимов, сведя их к однотипной системе;

разработать режимные конструкции конкретных типов схем различных классов, в том числе блочные конструкции, обеспечивающие наглядность и/или удобство практического использования в процессе проектирования или эксплуатации ВП;

тем самым решить проблему определения критичности состояний для большинства известных классов схем неуправляемых (НВП) и управляемых (УВП) ВП на единой методической, физико-математической и терминологической основе.

**Основные результаты.** Указанные задачи легко разрешимы при введении некоторой системы унифицированной символики, единой для любых схемных структур ВП. С этой целью параметры элементов внутренних ветвей схемных структур рассматриваемых ВП обозначим малыми буквами латинского алфавита ( $r, l, x, z$ ), элементов внешней части ВП (фильтров, нагрузки) — большими буквами ( $R, L, C, X, Z$ ). Причем через  $R$  без индекса обозначим сопротивление полезной нагрузки, с индексом

б — балластное или гасящее сопротивление, устанавливаемое в выходную продольную ветвь ВП с целью ограничения ударных токов через вентили, или демпфирования резонансных колебаний, или снижения уровня пульсаций в нагрузке при использовании Г-образного резистивно-емкостного  $R_0 R \| C$  фильтра. Если такие сопротивления установлены во внутренние ветви, их значения  $r_{\mu}$  учтем в общих сопротивлениях этих ветвей  $r_{\mu}$  ( $\mu=1, m$ ).

Буквой  $E$  обозначим: напряжение смещения  $E_{c\mu}$ , эквивалентно представляющее начальный участок ампер-вольтовой характеристики (АВХ) вентилей при замене реальных (нелинейных) АВХ смещенными двухлинейными [14]; противо-э.д.с.  $E_0$  обмотки двигателя в случае работы ВП на двигательную нагрузку [2, 10, 11]; э.д.с. аккумулятора  $E_a$  при установке его на выходе ВП; пороговое напряжение  $E_{п}$  варикапа, стабилитрона и других подобных элементов, устанавливаемых последовательно с вентилями или на выходе ВП; либо суммарное значение любых из указанных напряжений при их последовательном соединении.

Буквой  $S$  обозначена синусоидальность формы фазных э.д.с. для отличия от несинусоидальной формы  $\mathcal{E}$  и постоянной  $E$ .

Для упрощения допускаем также полную симметрию внутренних ветвей:

$$\mathcal{E}_{a\mu} = \mathcal{E}_a; \quad S_{a\mu} = S_a; \quad E_{c\mu} = E_c; \quad r_{\mu} = r; \quad l_{\mu} = l; \quad f_{\mu} = f; \quad (1)$$

$$x_{\mu} = \omega_{\mu} l_{\mu} = x = \omega l; \quad z_{\mu} = z; \quad \Psi_{\mu} = 2\mu^{-1}\theta,$$

где  $\mu^{-1} = \mu - 1$ ;  $m = 1, m_x$ ;  $\omega_{\mu} = 2\pi f_{\mu}$ ;  $\theta = \pi/m$ ;  $\mathcal{E}_{a\mu}$  ( $S_{a\mu}$ ),  $f_{\mu}$ ,  $\Psi_{\mu}$  — амплитуда, частота и фаза  $\mu$ -й э.д.с.

Воспользуемся теперь понятием «класс вентильных схем ВП», под которым понимается некоторая совокупность или множество конкретных преобразователей, представленных единой схемой замещения [4, 7, 8, 22–26]. Любая схема ВП данного класса входит как частная в общую схему класса. Ее топология совпадает с реальной схемой и содержит наиболее существенные (в отношении режима работы и расчетов ВП)  $\mathcal{E}$ ,  $S$ ,  $E$ ,  $r$ ,  $l$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$ -элементы. Такие элементы эквивалентно отражают реальные устройства ВП (трансформаторы, блоки вентилей, фильтры, нагрузку и пр.) и позволяют построить ключевые модели ВП с линейной частью при замене реальных (нелинейных) вентилей цепочкой из идеальных, безынерционных ключей и линейных  $E_c$ ,  $r_{пр}$ -элементов [4, 12–14, 19].

Принятые условия позволяют просто, кратко и наглядно обозначить любой класс схемных структур ВП и внести полную определенность в представление о том, какая именно структура рассматривается в каждом конкретном случае и что при этом можно ожидать. В результате удастся значительно сократить объем и повысить удобство изложения и восприятия материала по любому классу схем независимо от области применения ВП, исключить нередко встречающееся смешивание результатов анализа разных классов схем [15–18], обеспечить наиболее простым путем преемственность исследования идентичных классов и возможность проверки результатов анализа более сложных схем по известным результатам менее сложных схем. Введение классов и их точных обозначений позволяет в свою очередь весьма наглядно и просто систематизировать (упорядочить) существующее многообразие схемных структур ВП, унифицировать систему их классификации, внести ясность в их отличия и без дублирования идентичных, но многократных пояснений компактно представить любые результаты исследований ВП, в том числе по критичности их состояний, что и выполнено в табл. 1, 2.

В колонке 2 табл. 1, 2 каждый класс схем обозначен латинскими буквами учитываемых эквивалентных элементов, а также числа и формы фазных э.д.с., вида схем (управляемые, неуправляемые и т. д.) или их типа (лучевые, мостовые и т. п.). При этом «ключ» для расшифровки обозначен-

## Неуправляемые ВП

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
Нулевая критичность				
1	$S_m R$	+	$m$	$m = 1 \rightarrow P \subset 3,$ $m > 1 \rightarrow P \subset H$
2	$S_m R L$			
3	$S_m r R L$	При $m > 1$ нулевая критичность отсутствует	$m$	$m = 1 \rightarrow P \subset 3,$ $m > 1 \rightarrow P \subset K$
4	$S_m l R L$			
5	$S_m l r R L$			
6	$S_m r R L_\infty$			
7	$S_m l r R L_\infty$			
8	$S_m E R$	$\varepsilon_{кр} = \cos \theta; m > 2$	$m$ $\varepsilon$	$m < 3 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 2, \varepsilon \leq \varepsilon_{кр} \rightarrow P \subset H$ $\varepsilon > \varepsilon_{кр} \rightarrow P \subset 3$
9	$S_m E L$	$\varepsilon_{кр} = \sin \operatorname{arctg} \frac{1 - \cos 2\theta}{2\theta - \sin 2\theta}; m > 1$	$m$ $\varepsilon$	$m = 1 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 1, \varepsilon \leq \varepsilon_{кр} \rightarrow P \subset H^*$ $\varepsilon > \varepsilon_{кр} \rightarrow P \subset 3$
10	$S_m r E L_\infty$			
11	$S_m E R L_\infty$			
12	$S_m r E R L_\infty$			
13	$S_m R \parallel C$	$g_{с кр} = \operatorname{ctg} \theta; m > 2$	$m$ $g_c$	$m < 3 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 2, g_c \leq g_{с кр} \rightarrow P \subset H$ $g_c > g_{с кр} \rightarrow P \subset 3$

\* Кроме № 12, для которого  $P \subset K$ .

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
14	<i>SmERL</i>		$m$	$m > 1,$ $[e, \delta] \leq [e, \delta]_{кр} \rightarrow P \subset H$
15	<i>SmlrE</i>	$e_{кр} = \sin \operatorname{arctg} A_{кр};$	$g$	$m = 1 \rightarrow P \subset 3$
16	<i>SmlrEL</i>			
17	<i>SmlERL</i>			
18	<i>SmlrERL</i>	$A_{кр} = \frac{\cos \varphi [\sin (2\theta - \varphi) + \sin \varphi \exp (-2\delta\theta)]}{1 - \cos \varphi \cos (2\theta - \varphi) - \sin^2 \varphi \exp (-2\delta\theta)};$		
19	<i>SmlER</i>	$\varphi = \operatorname{arctg} g, \quad m > 1$	$e$	
20	<i>SmlrEL</i>			
21	<i>SmlrER</i>			
22	<i>SmlrERL</i>			
23	<i>SmER  C</i>	$g_{c\text{кр}} = \operatorname{ctg} \theta - e \operatorname{csc} \theta; \quad m > 2$	$m$ $g_c$ $e$	$m < 3 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 2,$ $[e, g_c] \leq [e, g_c]_{кр} \rightarrow P \subset H$
24	<i>SmlrR</i>		$m$	$m = 1 \rightarrow P \subset 3; \quad m = 2 \rightarrow P \subset 1$ $m > 2 \rightarrow P \subset K$
25	<i>SmlrER</i>	$e_{кр} = \cos \theta; \quad m > 2$	$m$ $e$	$m < 3 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 2, \quad e \leq e_{кр} \rightarrow P \subset K$

Таблица 1 (продолжение)

№	Класс схем	Формулы критичности	Определющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
26	$S_m R_0 R \parallel C_\infty$	$n_{кр} = \frac{tg \theta}{\theta} - 1; m > 2$	$m$	$r=0 \rightarrow P \subset H$
27	$S_m r R \parallel C_\infty$		$n$	$r \neq 0 \rightarrow P \subset K$
28	$S_m r R_0 R \parallel C_\infty$			$\rightarrow P \subset 3$
29	$S_m E R_0 R \parallel C_\infty$	$\epsilon_{кр} = (1 + N) \cos \theta - N \theta^{-1} \sin \theta; m > 2$	$m$	$r=0 \rightarrow P \subset H$
30	$S_m r E R \parallel C_\infty$		$n$	$r \neq 0 \rightarrow P \subset K$
31	$S_m r E R_0 R \parallel C_\infty$		$\epsilon$	$\rightarrow P \subset 3$
32	$S_m R_0 R \parallel C$	$e^{-2\theta\beta_0}_{кр} = \frac{\cos(\beta_0 - \beta + \theta)}{\cos(\beta_0 - \beta - \theta)}; m > 2$ $\delta_0 = tg \beta_0 = (1 + N) \delta_c; \delta_c = tg \beta$	$m$	$r=0 \rightarrow P \subset H$
33	$S_m r R \parallel C$		$g_c$	$r \neq 0 \rightarrow P \subset K$
34	$S_m r R_0 R \parallel C$		$n$	$\rightarrow P \subset 3$
35	$S_m L R \parallel C_\infty$	$g_{кр} = \theta^{-1} - 2 ctg \theta + \theta ctg^2 \theta$ $m > 1$ $g = \omega L/R$	$m$	$m > 1, g \leq g_{кр} \rightarrow P \subset 3$
36	$S_m l R \parallel C_\infty$		$g$	$\rightarrow P \subset H$
37	$S_m l l R \parallel C_\infty$			$m > 1, g \leq g_{кр} \rightarrow P \subset K$
38	$S_m E R_0 R \parallel C$	$e^{-2\theta\beta_0}_{кр} = \frac{\cos \beta_0 \cos(\theta + \beta_0) + n(\cos \theta - e)}{\cos \beta_0 \cos(\theta - \beta_0) + n(\cos \theta - e)}$ $\delta_0 = tg \beta_0 = (1 + N) \delta_c$	$m$	$m > 2,$ $[e, N, g_c] \leq [e, N, g_c]_{кр} \rightarrow P \subset H$
39	$S_m r E R \parallel C$		$\epsilon$	$\rightarrow P \subset 3$
40	$S_m r E R_0 R \parallel C$		$n$	$m > 2,$ $[e, N, g_c] \leq [e, N, g_c]_{кр} \rightarrow P \subset K$
			$g_c$	$\rightarrow P \subset 3$



№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
41	$SmlR_0R \parallel C_\infty$	$n_{кр} = A_{кр} \theta^{-1} \sin \theta - 1;$ $A_{кр} = \frac{\sin \theta + \cos \varphi \sin(\theta - \varphi) + \sin \varphi \cos(\theta + \varphi) e^{-2\theta\delta}}{\cos \varphi [\cos(2\theta - \varphi) + \sin \varphi e^{-2\theta\delta}]};$ $\varphi = \arctg g; \quad m > 1$	$m$	$m > 1,$ $[\delta, N] \leq [\delta, N]_{кр} \rightarrow P \subset K$ $\rightarrow P \subset 3$
42	$SmlrR \parallel C_\infty$		$g$	
43	$SmlrR_0R \parallel C_\infty$		$n$	
44	$SmlrLR \parallel C_\infty$			
45	$SmlrLLR \parallel C_\infty$			
46	$SmlER_0R \parallel C_\infty$	$N_{кр} = N_{кр}^{(41)} (1 - \varepsilon \csc \Psi_{кр});$ $1 - \cos \varphi \cos(2\theta - \varphi) - \sin^2 \varphi e^{-2\theta\delta};$ $tg \Psi_{кр} = \frac{\sin(2\theta - \varphi) + \sin \varphi e^{-2\theta\delta}}{\sin(2\theta - \varphi) + \sin \varphi e^{-2\theta\delta}};$ $\varphi = \arctg g; \quad m > 1$	$m$	$m > 1,$ $[\varepsilon, \delta, N] \leq [\varepsilon, \delta, N]_{кр} \rightarrow P \subset K$ $\rightarrow P \subset 3$
47	$SmlrER \parallel C_\infty$		$g$	
48	$SmlrER_0R \parallel C_\infty$		$n$	
49	$\Delta mlrELR \parallel C_\infty$		$\varepsilon$	
50	$SmlrELR \parallel C_\infty$			
51	$\mathcal{E}mR_0R \parallel C_\infty$	$n_{кр} = \frac{\sin \theta + \frac{1}{3} a \sin 3\theta}{\theta (\cos \theta + a \cos 3\theta)} - 1$	$m$	$m > 2, [N, a] \leq [N, a]_{кр} \rightarrow P \subset H$ $r=0 \rightarrow P \subset H$ $r \neq 0 \rightarrow P \subset K$ $\rightarrow P \subset 3$
52	$\mathcal{E}mrR \parallel C_\infty$		$a$	
53	$\mathcal{E}mrR_0R \parallel C_\infty$		$n$	
54	$\mathcal{E}mR_0R \parallel C_\infty$	$n_{кр} = \frac{\sin \theta - \frac{1}{3} a \sin 3\theta}{\theta (\cos \theta - a \cos 3\theta)} - 1; \quad m > 2$		$m = 1, 2; [a, N] \leq [a, N]_{кр.в} \rightarrow P \subset 3$ $\rightarrow P \subset 3_в$

Таблица 1 (прод.)

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима	
55	$\mathcal{E}mrR \parallel C_\infty$	$30n_{кр\ B} = \operatorname{tg} \lambda_B + 2 \sin \lambda_B; \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} m = m$ $a_{кр\ B} = (1 - \cos \lambda_B) / (1 - \cos 3\lambda_B);$ $a_{кр(в0)} = (\cos \Psi_B - \cos \theta) / (\cos 3\Psi_B - \cos 3\theta);$ $= \frac{(n_{кр(в0)} + 1) \theta - \Psi_B}{\cos \theta - a \cos 3\theta};$ $\frac{\sin \theta - \sin \Psi_B - \frac{1}{3} a (\sin 3\theta - \sin 3\Psi_B)}{\cos \theta - a \cos 3\theta};$ $n_{кр(в)(0)} = (\operatorname{tg} \theta + 2 \sin \theta) / 3\theta; \quad m > 2$ $a_{кр(в)(0)} = (1 - \cos \theta) / (1 - \cos 3\theta);$	$m$	$m > 2; a < a_{кр(в)(0)} \rightarrow P \subset 3$ $n_{кр\ B} < n < n_{кр} \rightarrow P \subset 3_B$ $m > 2; n < n_{кр(в)(0)} \rightarrow P \subset 3_B$ $a_{кр\ B} < a < a_{кр(в0)} \rightarrow P \subset 3_B$ $m > 2; a > a_{кр(в)(0)} \xrightarrow{r=0} P \subset 3_E$ $n_{кр(в0)} < n < n_{кр(эк)} \xrightarrow{r \neq 0} P \subset 3_E$ $m > 2; n > n_{кр(в)(0)} \xrightarrow{r=0} P \subset H$ $a_{кр} < a < a_{кр(эк)} \xrightarrow{r \neq 0} P \subset K$	
	$\mathcal{E}mrR_0R \parallel C_\infty$		$\mathcal{H} = \mathcal{H}^e$	$m$ $a$ $n$	$m < 3 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 2, [N, a, \Psi_3] \leq [N, a, \Psi_3]_{кр} \xrightarrow{r=0} P \subset$ $\xrightarrow{r \neq 0} P \subset$
56	$\mathcal{E}mR_0R \parallel C_\infty$	$\sin \theta + \frac{1}{3} a \cos \Psi_3 \sin 3\theta$ $n_{кр} = \frac{\sin \theta + \frac{1}{3} a \cos \Psi_3 \sin 3\theta}{\cos \theta + a \cos (3\theta + \Psi_3)} - 1;$ $P \subset 3_B \text{ не рассматривается}$	$\Psi_3$	$m < 3 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 2, [N, a, \Psi_3] \leq [N, a, \Psi_3]_{кр} \xrightarrow{r=0} P \subset$ $\xrightarrow{r \neq 0} P \subset$	
	$\mathcal{E}mrR \parallel C_\infty$				$m$ $a$ $n$ $\Psi_3$
	$\mathcal{E}mrR_0R \parallel C_\infty$				$\mathcal{H}^e = \mathcal{H}^e$
57	$\mathcal{E}mER_0R \parallel C_\infty$	$N_{кр} = N_{кр}^{(52)} (1 - e [\cos \theta + \cos 3\theta] - 1)$	$m$ $a$ $n$ $e$	$m < 3 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 2, [N, a, e] \leq [N, a, e]_{кр} \xrightarrow{r=0} P \subset H$ $\xrightarrow{r \neq 0} P \subset K$ $\rightarrow P \subset 3$	
58	$\mathcal{E}mrER \parallel C_\infty$				$\mathcal{H} = \mathcal{H}^e$
59	$\mathcal{E}mrER_0R \parallel C_\infty$				$\mathcal{H} = \mathcal{H}^e$

$$I^D S / S^D S = v \quad S^e S + I S = \infty$$

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
63	$\mathcal{E}^* m E R_6 R \  C_\infty$	$N_{кр} = N_{кр}^{(55)} \{1 - \varepsilon (\cos \theta - a \cos 3\theta)^{-1}\}$	$m$	$m > 2,$ $[N, a, \varepsilon] \leq [N, a, \varepsilon]_{кр} \rightarrow P \subset H$ $\rightarrow P \subset 3$
64	$\mathcal{E}^* m r E R \  C_\infty$		$n$	
65	$\mathcal{E}^* m r E R_6 R \  C_\infty$		$a$ $\varepsilon$	
66	$\mathcal{E}^* m E R_6 R \  C_\infty$	$N_{кр} = N_{кр}^{(58)} \{1 - \varepsilon [\cos \theta + a \cos (3\theta + \Psi_3)]^{-1}\}$	$m$	$m > 2,$ $[N, a, \varepsilon, \Psi_3] \leq [N, a, \varepsilon, \Psi_3]_{кр} \rightarrow I$ $\rightarrow I$
67	$\mathcal{E}^* m r E R \  C_\infty$		$n$	
68	$\mathcal{E}^* m r E R_6 R \  C_\infty$		$\varepsilon$ $a$ $\Psi_3$	$m > 2,$ $[N, a, \varepsilon, \Psi_3] \leq [N, a, \varepsilon, \Psi_3]_{кр} \rightarrow P$ $\rightarrow P$
69	$\mathcal{E}^* m R_6 R \  C_\infty$	$n_{кр v} = \frac{\sum_v a_v \cos \Psi_v \sin v\theta}{\theta \sum_v a_v \cos (v\theta + \Psi_v)} - 1$	$m$	$m > 2, [N, a_v, \Psi_v]_v \leq$ $\leq [N, a_v, \Psi_v]_{v,кр} \xrightarrow{r=0} P \subset H$ $\xrightarrow{r \neq 0} P \subset K$ $\rightarrow P \subset 3$
70	$\mathcal{E}^* m r R \  C_\infty$		$n$	
71	$\mathcal{E}^* m r R_6 R \  C_\infty$		$a_v$ $\Psi_v$ $v$	
72	$\mathcal{E}^* m E R_6 R \  C_\infty$	$N_{кр v} = N_{кр v}^{(70)} \left\{1 - e \left[ \sum_v a_v \cos (v\theta + \Psi_v) \right]^{-1}\right\}$	$m$	$m > 2, [N, \varepsilon, a_v, \Psi_v]_v \leq$ $\xrightarrow{r=0} P \subset H$ $\xrightarrow{r \neq 0} P \subset K$ $\rightarrow P \subset 3$
73	$\mathcal{E}^* m E r R \  C_\infty$		$a_v$	
74	$\mathcal{E}^* m r E R_6 R \  C_\infty$		$n$ $\Psi_v$ $\varepsilon$ $v$	

\*  $\mathcal{E} \subset \mathcal{E}_{\mu v} = \sum_v S_{\mu v} = \sum_v a_v \cos (v\theta + \Psi_v - 2\mu\theta)$ ;  $\mu = 1, 2, \dots, m$ ;  $v = 1, 2, \dots, v_x$ ;  $\Psi_1 = 0$ .

Таблица 1 (прод.)

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
Критичность $k$ -го порядка				
74a	$SkmrR$	$n_{кр k} \approx \text{tg } k^+\theta \text{ ctg } \theta - k^+$ ; $k = 1, 2, \dots, k_x$	$m$	$n \geq n_{кр k} \rightarrow P \subset K_{k^+}$ $n < n_{кр k} \rightarrow P \subset K_k$
75	$SkmrR \parallel C_\infty$	$n_{кр k} = 0^{-1} \text{tg } k^+\theta - k^+$ ; $k = 0, 1, \dots, k_x$	$m$	$n \geq n_{кр k} \rightarrow P \subset K_{k^+}$ $n < n_{кр k} \rightarrow P \subset K_k$
76	$SkmrR_0R \parallel C_\infty$			
77	$SkmrRL_\infty$	$N_{кр k^-} = \frac{1}{k} \left( \frac{1}{k^+ T_k} - 1 \right)$ ; $k^- = 1, 2, \dots, k_x^-$ $T_k = (\text{ctg } \theta - k \text{ ctg } k\theta)/k^+$	$n$	$n < 1$
78	$SkmrER$	$N_{кр k} = N_{кр k}^{(74a)} (1 - \varepsilon \text{sc } k^+\theta)$ ; $k = 1, 2, \dots, k_x$	$m$	$m > 2$
79	$SkmrER \parallel C_\infty$	$N_{кр k} = N_{кр k}^{(75)} (1 - \varepsilon \text{sc } k^+\theta)$ ; $k = 0, 1, \dots, k_x$	$\varepsilon$	$[N, \varepsilon] \leq [N, \varepsilon]_{кр k} \rightarrow P \subset K_{k^+}$ $\rightarrow P \subset K_k$
80	$SkmrER_0R \parallel C_\infty$			
81	$SkmrERL_\infty$	$N_{кр k^-} = N_{кр k}^{(77)} - \varepsilon/(T_k k^+ \sin k\theta)$ ; $k^- = 1, 2, \dots$	$n$	$m > 1$
82	$SmlRL_\infty$	$\varepsilon_{R, кр 1} \approx 20 \frac{a - \sin 3\theta}{a + \sin 3\theta}$ ; $a = \sqrt{\sin^2 \theta + (2 \sin \theta \sin 2\theta)^2}$	$m$ $\varepsilon_R$	$m > 1$ ; $\varepsilon_R \leq \varepsilon_{R, кр 1} \rightarrow P \subset K_{II}$ $\rightarrow P \subset K_I$

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
83	$SkmLR \parallel C_\infty$ $k = 1, 2, \dots, k_x$	$g_{Rkp k} = k\theta \left( \frac{kA_k}{k^+ A_k(\gamma) B_k(\gamma)} - k^+ \right);$ $a_k = \frac{\sin k\theta}{k \sin \theta}; \quad a_{k^+} = \frac{\sin k^+\theta}{k^+ \sin \theta};$ $A_k = 1 - 2a_k \cos k\theta + a_k^2;$ $A_k(\gamma) = a_{k^+} \sin \gamma_k + a_k \sin(\theta - \gamma_k);$ $B_k(\gamma) = \sin(\gamma_k + k\theta) - a_{k^+} \sin \gamma_k;$ $\gamma_k = \theta - (\Psi_k - \Psi_{k^+})/2; \quad \operatorname{tg} \Psi_k = \frac{a_k \sin k\theta}{1 - a_k \cos k\theta}$	$m$  $g_R$	$m > 1,$ $g_R \lesssim g_{Rkp k} \rightarrow P \subset K_k$ $\rightarrow P \subset K_k$ $\rightarrow P \subset K_{IIk}$
84	$SkmLR \parallel C_\infty$		$m$	$m = 1 \rightarrow P \subset 3;$
85	$SkmLR \parallel C_\infty$	$\theta g_{kp k} - 1 = \left( \frac{k^+\theta}{\sin k^+\theta} \right)^2 - \frac{2k^+\theta}{\operatorname{tg} k^+\theta} - 3k^+\theta^2$	$g$	$m > 1, \quad g \gtrsim g_{kp k} \rightarrow P \subset K_k$ $\rightarrow P \subset K_{k^+}$
86	$SkmrER \parallel C$	$e^{-2\theta\delta_{kp k}} = \frac{y_k \cos k^+\theta - S_a^{(k)} \sin \beta_k \sin(\theta + \beta_k) - \varepsilon}{y_k \cos k^+\theta + S_a^{(k)} \sin \beta_k \sin(\theta - \beta_k) - \varepsilon};$ $\delta_k = (1 + k^+N) \delta_c = \operatorname{tg} \beta_k;$ $y_k = n + k^+; \quad S_a^{(k)} = k^+ a_{k^+}$	$m$ $\varepsilon$ $n$ $g_c$	$m < 3 \rightarrow P \subset 3;$ $m > 2,$ $[N, \varepsilon, g_c] \lesssim [N, \varepsilon, g_c]_{kp k} \rightarrow P \subset$ $\rightarrow P \subset$
87	$SkmrER_0R \parallel C$			

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
88	SmlrRL <sub>∞</sub>	$N_{кр} = \frac{1}{2\theta} \left[ \frac{\cos \gamma \sin(\gamma + \Psi + \theta)}{\cos(\Psi + \theta)} + \gamma \right] - 1; \gamma = \Gamma/2;$ $\Gamma_{кр l} \leq \Gamma_{кр} \leq 2\theta; 0 \leq \delta_B \leq \infty;$ $\text{tg } \Gamma_{кр l} = 2 \sin \theta \sin 2\theta / \sin 3\theta;$ $\text{tg } \Psi_{кр} = A_{кр}(\gamma) = \frac{1 + (\text{tg } \theta - 2 \text{tg } \gamma_{кр}) \text{tg } \gamma_{кр}}{3 \text{tg } \gamma_{кр} - \text{tg } \theta};$ $\cos \theta + \cos \varphi \cos(\theta - \varphi + \Gamma_{кр}) -$ $A_{кр}(\gamma) = \frac{-\sin \varphi \sin(\theta + \varphi) e^{-\delta_B \Gamma_{кр}}}{\sin \theta + \cos \varphi \sin(\theta - \varphi + \Gamma_{кр})} +$ $+ \sin \varphi \cos(\theta - \varphi) e^{-\delta_B \Gamma_{кр}}$	<i>m</i>	$m > 1,$ $[n, \varepsilon_B] \cong [n, \varepsilon_B]_{кр} \rightarrow P \subset K_2$ $[n, \varepsilon_B] \leq [n, \varepsilon_B]_{кр} \rightarrow P \subset K_1$
		$(k N_{кр k} + 1) k + \theta - \gamma_k = \frac{A_k(\gamma) \sin(\gamma_k + \Psi_k + k\theta)}{a_{k+} \sin(\Psi_k + k\theta) - \sin \Psi_k};$ $\gamma_k = \Gamma_k/2; \Gamma_{кр k} \leq \Gamma_{кр} \leq 2\theta; 0 \leq \delta_B \leq \infty;$ $A_k(\gamma) = A_k^{(88)}(\gamma); a_{k+} = a_{k+}^{(88)};$ $a_{k+} \sin \gamma_k \cos(k\theta + \gamma_k) + \frac{1}{2} \sin 2(\theta - \gamma_k)$ $\text{tg } \Psi_{кр k} = \frac{\sin \gamma_k \sin(k\theta + \gamma_k) + \sin^2(\theta - \gamma_k)}{a_{k+} \sin \gamma_k \sin(k\theta + \gamma_k) + \sin^2(\theta - \gamma_k)};$ $\gamma_k = \gamma_{кр k}$	<i>n</i>	$m > 1,$ $[n, \varepsilon_B] \leq [n, \varepsilon_B]_{кр k} \rightarrow P \subset K_k$ $[n, \varepsilon_B] \leq [n, \varepsilon_B]_{кр k} \rightarrow P \subset K_{k+}$
89	SkmlrRL <sub>∞</sub>			

ния весьма прост. Так, например, класс  $SmR\|C$ , указанный в табл. 1 под № 13, объединяет различные  $m$ -фазные лучевые ( $M=m/2$ -фазные мостовые) схемы с параллельным  $R\|C$  фильтром при конечных значениях фильтровой емкости  $C$  и синусоидальной форме фазных э.д.с.  $S_\mu$  [24].

Аналогично под № 53 и 56 указаны схемы класса  $\mathcal{E}mrR_0R\|C_\infty$  с  $\Gamma$ -образным  $R_0R\|C$  фильтром при условии «бесконечной» емкости, наличии внутренних активных сопротивлений  $r_\mu$  и несинусоидальных бигармонических э.д.с.  $\mathcal{E}_\mu=S_{1\mu}+S_{3\mu}$ , содержащих первую  $S_{1\mu}$  и синфазную ей (с фазой  $\Psi_3=0$ , № 53) либо противофазную ( $\Psi_3=\pi$ , № 56) третью  $S_{3\mu}$  гармоники [26].

Класс № 89, обозначенный в виде  $SkmlrRL_\infty$ , объединяет совокупность  $m$ -фазных схем с нагрузкой индуктивного характера при условном допущении  $L\rightarrow\infty$ , наличии активных  $r_\mu$  и индуктивных  $l_\mu$  внутренних сопротивлений, при синусоидальных э.д.с.  $S_\mu$  и работе схем в коммутационных режимах  $k$ -го порядка. Расшифровка обозначений остальных классов схем аналогична.

Как видим, общность результатов и распространенность их на любые  $m$ -фазные ( $m=1, m_x$ ) лучевые схемы отмечается для всех классов схем символом  $m$ . Но любые результаты, данные в табл. 1, 2 по нулевой критичности состояний, справедливы также для  $M=m/2$ -фазных мостовых схем, для которых достаточно в приведенных формулах очевидным образом учесть значения  $r_\mu, x_\mu, E_\mu$ . Например, для трехфазной ( $M=3$ ) мостовой схемы (Ларионова) класса  $SMrR\|C_\infty$  (№ 27 НВП) достаточно принять  $m=6$ , а вместо значения  $r$  для параметра  $n=r/R$  следует подставить  $2r$ , если значение  $r$  по-прежнему относится к одной фазе, или  $r$ , если оно учитывает полное сопротивление внутренней ветви моста, т. е. оба сопротивления, относящиеся к двум любым линейным проводам из трех, подходящих к мосту.

Индекс  $\infty$  у  $C$  или  $L$  соответствует условным допущениям  $C\rightarrow\infty, L\rightarrow\infty$ , которые широко используют в литературе для упрощения математических выкладок при часто встречающихся на практике сочетаниях параметров  $\omega RC\gg 0$  — в схемах с нагрузкой емкостного характера или  $\omega L/R\gg 0$  — в схемах с нагрузкой индуктивного характера. Такие упрощения, как известно, особенно существенны при наличии сложных, например многозвенных фильтров, в сильной степени усложняющих математическое описание и анализ электромагнитных процессов в ВП. В связи с этим полезно указать: уравнения критичности и режимные портреты схем, относящиеся к классам с  $L_\infty, C_\infty$ , справедливы также в общих случаях каскадного соединения  $\Gamma$ - или  $\Pi$ -образных  $LC$ - или  $CLC$ -фильтров.

При работе схем в коммутационных режимах  $k$ -го порядка к символике классов добавляется буква  $k$ , а для управляемых схем — буква  $\alpha$ . При этом под  $k$ -м понимается такое состояние схемной структуры ВП, при котором интервал повторяемости процессов  $\theta_n$  или (при рассмотрении стационарных режимов) период  $2\theta$  содержит два подынтервала коммутации:  $k$ -й и  $k$ -й, в которых, циклически обновляясь в каждом  $\mu$ -м интервале ( $\mu=1, m$ ), одновременно работает соответственно  $k^+$  и  $k^-$  внутренних ветвей (фаз трансформатора, вентилях, предвключенных элементов и пр.), где  $k^\pm=k\pm 1$ .

Такие состояния обозначены в виде  $P\subset K_k$  ( $k=1, k_x$  — номер режима), а состояния с мгновенной коммутацией — в виде  $P\subset H$  [7, 8, 12–14, 25]. Те и другие состояния отражают режимы непрерывного выходного тока.

Режимы прерывистого выходного тока обозначены в виде  $P\subset Z$ . Здесь интервал  $\theta_n$  (период  $2\theta$ ) содержит подынтервал полного закрытия всех вентилях внутренних ветвей, что и создает паузы нулевых значений (перерывы) в форме выходного тока. Режим  $P\subset Z_n$ , указанный в колонке 5 табл. 1 для схем классов № 54–56 с бигармоническими э.д.с. вида  $\mathcal{E}_\mu=S_{1\mu}+S_{3\mu}$ , является разновидностью режимов  $P\subset Z$ , отличаясь лишь тем, что общий за  $\pi$  интервал проводимости вентиля дополнительно содержит подынтервал непроводящего состояния [26].

Управляемые ВП

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима		
Нулевая критичность						
1	$S_{amR}$	$\alpha_{0\text{кр}} = \pi/2 - \theta; \quad m > 1$	$m$	$m > 1,$ $\alpha_0 \leq \alpha_{0\text{кр}} \rightarrow P \subset H$ $\rightarrow P \subset \cup 3$		
2	$S_{amr}$		$\alpha_0$			
3	$S_{amER}$	$e_{\text{кр}} = \cos(\theta + \alpha_0); \quad m > 1$	$m$	$m > 1,$ $[e, \alpha_0] \leq [e, \alpha_{0\text{кр}}] \rightarrow P \subset H$ $\rightarrow P \subset \cup 3$		
4	$S_{amrE}$		$\alpha_0$			
5	$S_{amrER}$		$e$			
6	$S_{amrR}$	$\alpha_{0\text{кр}} = \pi/2 - \theta;$ $\alpha_{0r} = \frac{(1+n)\sin 2\theta}{1-(1+n)\cos 2\theta};$ $\alpha_{0\text{нл}} = -\alpha_{0r}; \quad n_{\text{кр}1} = \sec 2\theta - 1; \quad m > 2$	$m$ $n$ $\alpha_0$	$m > 2,$ $\alpha_0 > \alpha_{0\text{кр}} \rightarrow P \subset \cup 3$ $\alpha_{0r} < \alpha_0 < \alpha_{0\text{кр}} \rightarrow P \subset H$ $\left. \begin{matrix} \alpha_{0\text{нл}} < \alpha_0 < \alpha_{0r} \rightarrow \text{УВ} \\ \alpha_0 < \alpha_{0\text{нл}} \rightarrow \text{HB} \end{matrix} \right\} P \subset K$		
7	$S_{amRL}$	$\alpha_{0\text{кр}} = \varphi + \arctg [\text{ctg } \theta \text{ th } (\delta\theta)],$ $\text{tg } \varphi = g, \quad m > 1$	$m$	$m > 1,$ $[\delta, \alpha_0] \leq [\delta, \alpha_{0\text{кр}}] \rightarrow P \subset H$ $\begin{matrix} r=0 \rightarrow P \subset H \\ r \neq 0 \rightarrow P \subset K \\ \rightarrow P \subset \cup 3 \end{matrix}$		
8	$S_{amr}$		$g$			
9	$S_{amrL}$		$\alpha_0$			
10	$S_{amrRL}$		$m > 1, P \subset \cup 3$		$m \rightarrow 1, P \subset \cup 3$	
11	$S_{amrRL}$					
12	$S_{amrR}$					
13	$S_{amrL}$					
14	$S_{amrR}$					
15	$S_{amrRL}$					



№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
16	<i>SamERL</i>	$\varepsilon_{\text{кр}} = \cos \varphi [\cos(\varphi + \theta - \alpha_0) + A \sin(\varphi - \alpha_0)],$ $A = 2 \sin \theta / (1 - e^{-2\theta});$ $0 \leq \varepsilon_{\text{кр}} \leq \varepsilon_{\text{н}}, \quad \alpha_{0\text{кр}} \leq \alpha_{0\text{н}} \leq \pi/2,$ $\operatorname{tg} \varphi = g, \quad m > 1$	$m$	$m > 1,$ $[\delta, \varepsilon, \alpha_0] \leq [\delta, \varepsilon, \alpha_0]_{\text{кр}} \xrightarrow{l, r \neq 0} P \subset H$ $\alpha_0 \leq \alpha_{0\text{н}} \xrightarrow{l, r \neq 0} P \subset K$ $\xrightarrow{l, r \neq 0} P \subset 3$ $\alpha_0 \leq \alpha_{0\text{н}} \xrightarrow{\text{HB}} \text{HB}$ $\xrightarrow{\text{YB}} \text{YB}$
17	<i>SamLE</i>		$\varepsilon$	
18	<i>SamLEL</i>		$g$	
19	<i>SamLERL</i>		$\alpha_0$	
20	<i>SamLERL</i>		$m = 1 \rightarrow P \subset 3$	
21	<i>SamLER</i>			
22	<i>SamLEL</i>			
23	<i>SamLER</i>			
24	<i>SamLEL</i>			
25	<i>SamLR</i>    $C_\infty$	$g_{\text{кр}} = \frac{\theta \operatorname{ctg} \theta - 1}{\operatorname{tg}(\alpha + \theta)}; \quad \left. \begin{array}{l} m > 1 \\ g_{\text{кр}} \geq g_{\text{н}} \\ \alpha_{\text{кр}} \geq \alpha_{\text{н}} \end{array} \right\}$	$m$	$m = 1, [\alpha, g] \leq [\alpha, g]_{\text{кр}} \xrightarrow{\text{HB}} \text{HB} P \subset 3;$ $m > 1,$ $\alpha > \alpha_{\text{нкр}} \xrightarrow{\text{YB}} \text{YB} \left. \vphantom{\alpha > \alpha_{\text{нкр}}} \right\} P \subset 3$ $g_{\text{н}} < g < g_{\text{нкр}} \xrightarrow{\text{HB}} \text{HB}$ $\alpha < \alpha_{\text{нкр}} \xrightarrow{\text{YB}} \text{YB}$ $g > g_{\text{нкр}} \xrightarrow{\text{HB}} \text{HB}$ $\alpha < \alpha_{\text{н(к)}} \xrightarrow{\text{HB}} \text{HB} \left. \vphantom{\alpha < \alpha_{\text{н(к)}}} \right\} P \subset K$ $g > g_{\text{нкр}} \xrightarrow{\text{YB}} \text{YB} \left. \vphantom{g > g_{\text{нкр}}} \right\} P \subset H$ $\alpha_{\text{н(к)}} < \alpha < \alpha_{\text{кр}} \xrightarrow{\text{YB}} \text{YB} \left. \vphantom{\alpha_{\text{н(к)}} < \alpha < \alpha_{\text{кр}}} \right\} (l \neq 0)$ $\alpha_{\text{н(к)}} < \alpha < \alpha_{\text{кр}} \xrightarrow{\text{YB}} \text{YB} \left. \vphantom{\alpha_{\text{н(к)}} < \alpha < \alpha_{\text{кр}}} \right\} (l = 0)$
26	<i>SamLR</i>    $C_\infty$	$g_{\text{н}\theta} = (1 - \lambda_{\text{н}} \operatorname{ctg} \lambda_{\text{н}})^2; \quad m \geq 1;$	$\alpha$	
27	<i>SamLLR</i>    $C_\infty$	$\operatorname{ctg} \alpha_{\text{нкр}} = \theta \operatorname{csc}^2 \theta - \operatorname{ctg} \theta$ $\theta g_{\text{нкр}} = (1 - \theta \operatorname{ctg} \theta)^2 \quad \left. \vphantom{\theta g_{\text{нкр}} = (1 - \theta \operatorname{ctg} \theta)^2} \right\} m > 1$	$g$	

Таблица 2 (продолжен)

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
28	$SamERL_{\infty}$	$\varepsilon_{кр} = \theta^{-1} \sin \theta \cos \alpha_0; 0 \leq \varepsilon_{кр} \leq \varepsilon_H,$	$m$	$m > 2,$
29	$SamEL$	$\alpha_{0H} \leq \alpha_{0кр} \leq \pi/2; \operatorname{tg} \alpha_{0H} = \theta^{-1} - \operatorname{ctg} \theta,$	$\varepsilon$	$\left\{ \begin{array}{l} l=0 \rightarrow P \subset H \\ l \neq 0 \rightarrow P \subset K \\ \rightarrow P \subset 3 \end{array} \right.$
30	$SamLEL$	$\varepsilon_H = \cos(\theta - \alpha_{0H}); m > 1$	$\alpha_0$	
31	$SamLE$			
32	$SamR_6R \parallel C_{\infty}$	$n_{кр} = \frac{\sin \theta \sin(\alpha + \theta)}{\theta \sin(\alpha + 2\theta)} - 1; \begin{cases} m > 2 \\ n_{кр} \geq n_{Hкр} \\ \alpha_{кр} \geq \alpha_{Hкр} \end{cases}$	$m$	$m < 3, [\alpha, n] \leq [\alpha, n]_{кр} \rightarrow HB, P \subset 3;$ $m > 2,$
33	$SamrR \parallel C_{\infty}$	$\alpha_H = \pi/2 - \lambda_H; \operatorname{tg} \lambda_H - \lambda_H = \theta n_H; m \geq 1;$ $\alpha_H > \alpha_{Hкр}; n_H > n_{Hкр};$	$\alpha$	$\left. \begin{array}{l} \alpha > \alpha_{Hкр} \rightarrow YB \\ n_H < n_{Hкр} \rightarrow YB \\ \alpha < \alpha_{Hкр} \rightarrow HB \\ n < n_{Hкр} \end{array} \right\} P \subset 3$
34	$SamrR_6R \parallel C_{\infty}$	$\alpha_{Hкр} = \pi/2 - \theta, n_{Hкр} = \operatorname{tg} \theta / \theta - 1, m > 2$	$n$	$\left. \begin{array}{l} \alpha < \alpha_{H(к)} \rightarrow HB \\ n > n_{Hкр} \end{array} \right\} P \subset K \\ \left. \begin{array}{l} \alpha_{H(к)} < \alpha < \alpha_{кр} \rightarrow YB \\ (r \neq 0) \\ P \subset H \\ (r = 0) \end{array} \right\} P \subset 3$

№	Класс схем	Формулы критичности	Определяющие параметры	Алгоритм оценки типа режима
35	$SamLR_6R \parallel C_\infty$	$m > 1,$ $(n_{кр} + 1) \theta = \frac{\sin \theta \sin (\alpha + \theta) (1 - e^{-2\theta}) \operatorname{ctg} \varphi}{\sin (2\theta + \alpha - \varphi) + \sin (\varphi - \alpha) e^{-2\theta}};$	$m$	$m = 1,$ $[n, g, \alpha] \leq [n, g, \alpha]_{н} \rightarrow \text{HB } P \subset 3;$
36	$SamLR \parallel C_\infty$	$\operatorname{ctg} \alpha_{н} = (\theta n_{н} + \lambda_{н}) \operatorname{csc}^2 \lambda_{н} - \operatorname{ctg} \lambda_{н}, \quad m \geq 1,$	$n$	$m > 1,$ $[n, g, \alpha] \leq [n, g, \alpha]_{нкр} \rightarrow \text{HB } P \subset 3;$
37	$SamLR_6R \parallel C_\infty$	$e^{-\delta_{н} \lambda_{н}} = \frac{\sin^2 \lambda_{н} - [(\theta n_{н} + \lambda_{н}) \sin (\Lambda_{н} - \varphi_{н}) + \sin \lambda_{н} \sin (\varphi_{н} - \lambda_{н})] \cos \varphi_{н}}{[(\theta n_{н} + \lambda_{н}) \cos \varphi_{н} - \sin \lambda_{н} \cos (\varphi_{н} + \lambda_{н})] \sin \varphi_{н}};$	$g$	$\alpha > \alpha_{нкр} \rightarrow \text{HB}$ $[n, g] < [n, g]_{н} \rightarrow \text{HB}$ $[n, g]_{н} < [n, g] < [n, g]_{нкр} \rightarrow \text{УВ}$ $P \subset 3;$
38	$SamLR \parallel C_\infty$	$m \geq 1,$	$\alpha$	$\alpha < \alpha_{нкр} \rightarrow P \subset K$ $[n, g] > [n, g]_{нкр} \rightarrow P \subset K$
39	$SamLR \parallel C_\infty$	$[n, g, \alpha]_{нкр} = [n, g, \alpha]_{н}   \lambda_{н} = \theta$		

Примечание 1. Для классов управляемых схем с № 44, 45, 49, 50, 74а, 75, 77–79, 81, 86, 88, 89 и для управляемых с № 6, 38, 39 параметр  $n = r/R$ , а с № 76, 80, 87 –  $n = (R_6 + r)/R$ .

2. Параметр  $g$  для классов управляемых схем с № 84, 85 и управляемых с № 25–27 соответствует значениям, указанным в № 35–37.

3. В каждом из трех классов управляемых схем с № 26–34, 41–43, 46–48, 51–74 и управляемых с № 32–37 параметр  $n$  соответственно равен  $R_6/R, r/R, (r + R_6)/R$ .

4. В каждом из пяти классов управляемых схем с № 41–50 и управляемых с № 35–39 параметр  $g$  соответственно равен  $\omega l/R_6, \omega l/r, \omega l/(r + R_6), \omega l/r, \omega (l + L)/r$ .

5. В каждом из девяти классов управляемых схем с № 14–22 и управляемых с № 7–24 параметр  $g$  соответственно равен  $\omega L/R, \omega l/r, \omega (l + L)/r, \omega (l + L)/R, \omega L/(r + R), \omega l/R, \omega l/(r + R), \omega (l + L)/(r + R)$ .