

A new method of engineering synthesis  
of valve electrical circuits using inductive filters

Новый метод инженерного синтеза вентильных схем  
с индуктивными фильтрами

Впервые в электронной  
версии. Скан-копия.  
24.11.2011

*В ЗНАК ДОБРОЙ ПАМЯТИ ПОСВЯЩАЕТСЯ*

*Друзьям, товарищам, коллегам, хорошим людям 1960-80-х годов:*

Исаю Ильичу Белопольскому (нач. ведущего в подотрасли отд. по источникам электропитания, НИИ-ДАР /дальней радиолокации),

Фёдору Фёдоровичу Волкову, главному конструктору БРЛС, НИИР (радиостроения) МинРадиопрома),

Владимиру Николаевичу Аксёнову, зав. каф. электропитания устройств связи ВЗЭС Минсвязи,

Эфроилу Леонтьевичу Блоху (зав. кафедрой математики МЭС, сотруднику Института проблем передачи информации (ИППИ) АН СССР),

Льву Александровичу Жекулину (зав. каф. ТОЭ, зав. отд. Института радиоэлектроники (ИРЭ) АН),

Вуколу Михайловичу Лаврову ("энциклопедии" той же кафедры ТОЭ МЭС Минсвязи СССР),

Леониду Робертовичу Нейману, академику (по направлению «электротехника») АН СССР, зав.каф.ТОЭ, ЛПИ,

Льву Ароновичу Синицкому (профессору Львовского госуниверситета),

Кронику Павловичу Собинову (руководителю темы ВНИИМАШ, академическому аспиранту известного 1930-х годов специалиста по выпрямителям А.М. Утевского).

*A. M. Repin*

*Новый метод инженерного  
синтеза вентильных схем  
с индуктивными фильтрами  
и внутренними индуктивностями*

*Научный отзыв*

*— 1978 — Москва*

МИНИСТЕРСТВО РАДИОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

Научно-исследовательский институт радиостроения  
- НИИР -

Инв. № 006.78

№ гос. регистрации  
Я 51388

УТВЕРЖДАЮ



Зам. директора  
по научной работе  
доктор техн. наук

Волков Ф.Ф.  
8/16/78

НАУЧНЫЙ ОТЧЁТ

по теме: Исследование электромагнитных процессов  
вентильных структур с фильтрами  
(цифр "Цикл")

этап 2: Новый метод инженерного синтеза вентильных  
схем с индуктивными фильтрами и внутренними  
индуктивностями

На 40 стр.

Нач. отдела

Нач. лаб.  
канд. техн. наук

Науч. рук. темы,  
отв. исполнитель  
канд. техн. наук

4  
1

8/10/78

РЕПИН А.М.

Москва

1978

# Выписка из протокола № 7

заседания секции НТС п/я А-14 от 13/11 1978г

Заслушаны и обсуждены результаты отчёта "Новый метод инженерного синтеза вентиляльных схем с индуктивными фильтрами и внутренними индуктивностями".

Найдено, что изложенные в отчёте сведения представляют широкий практический интерес и полезны для разработчиков вентиляльных преобразователей РЭА, а также ряда других агрегатов и устройств (инвертеров, асинхронных вентиляльных каскадов, индуктивно-ёмкостных преобразователей с вентиляльным выходом, авиационных вентиляльных генераторов и т.п.). Полезность результатов состоит также в их принципиальной новизне и распространяемости на все технические отрасли страны.

Отчёт написан на достаточно высоком научном уровне, результаты заслуживают опубликования, а сам отчёт - утверждения.

Председатель НТС

Учёный секретарь

ХОРОШИЛОВА В.В.

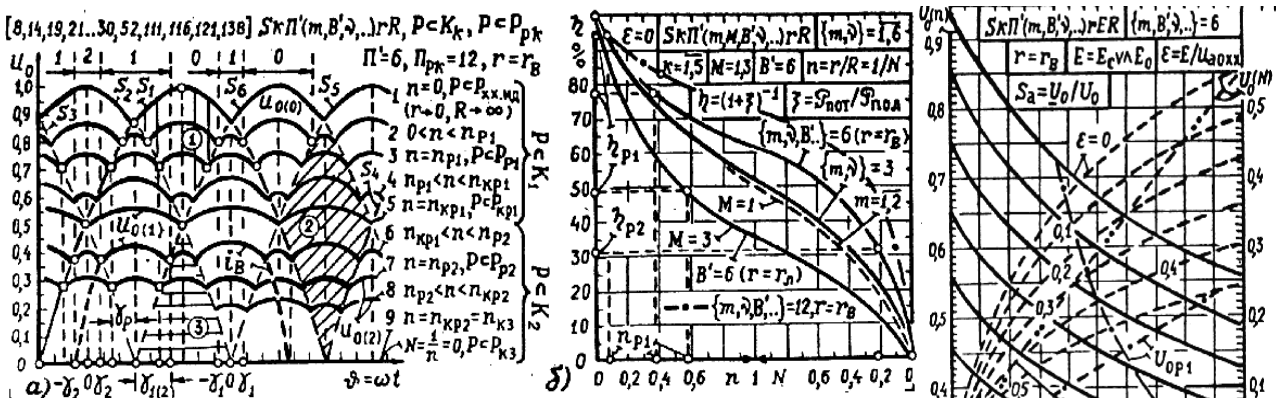


Рис. 1. Параметрическая динамика напряжения  $U_0$  на полезной нагрузке  $R$  неуправляемых 6-лучевых, 6-вентильных кольцевых,  $m, B, \gamma, V, O$  и других резистивных, вентиляльных схем (ВС) класса  $SK\Pi(m, B, \gamma, \dots) rR, P < K_k, P < P_{pk}$  (неосвещенных или интегрированных, или диакотированных на  $k_x = 2 \dots 3$  элементарные подсхемы, ...) при работе в первом и втором коммутационных ( $P < K_1, P < K_2$ ) и редуцированных ( $P < P_{p1}, P < P_{p2}$ ), первом критическом ( $P < P_{kp(1)}$ ) и режимах ХХ и КЗ при  $\{m, B, \gamma, \dots\} = 6$  (а) УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НОМОГРАММА КПД при  $\{m, \gamma, \dots\} = 1, 6, 3, 2$  (б)

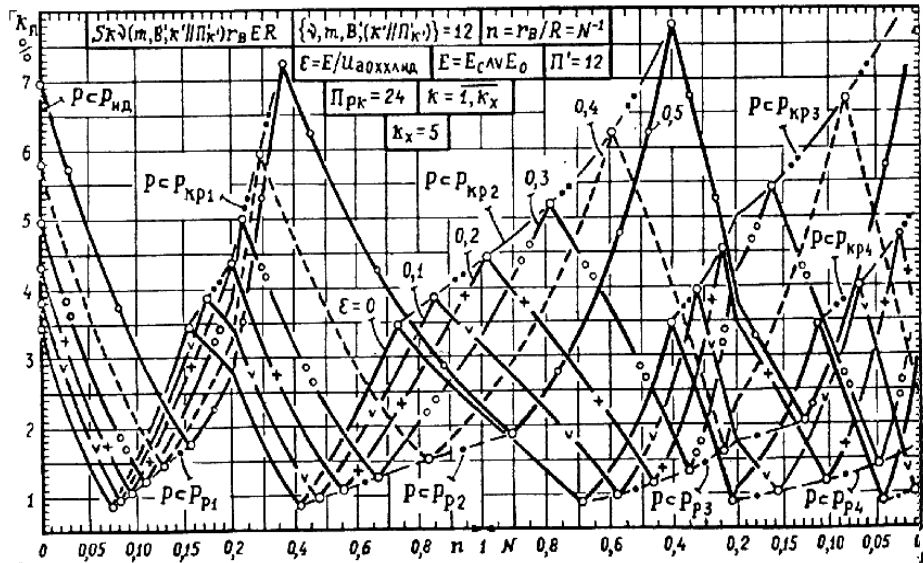


Рис. 2. УНИВЕРСАЛЬНАЯ, НАГЛЯДНО ПОДТВЕРЖДАЮЩАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ  $\eta$ -ЯВЛЕНИЙ, ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НОМОГРАММА ПЕРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПУЛЬСАЦИИ ОТ  $\{n, N\} \in [0, \infty]$  ПРИ  $\varepsilon = [0; 0,5]$  - УДР РЕЗИСТИВНЫХ ВС КЛАССА  $SK\Pi(m, B, \gamma, \dots) rR$  ( $r = r_1$  в  $B^1, V, O, \dots$  СХЕМАХ;  $r = r_2$  в ДИАКОТИРОВАННЫХ  $K/P/K_x$ -СХЕМАХ;  $r = r_3, \text{var}_1$  в  $m, \gamma$ -ЛУЧЕВЫХ СХЕМАХ) ПРИ ИХ РАБОТЕ В РЕЖИМАХ ОТ ХХ ДО КЗ: В ПЯТИ КОММУТАЦИОННЫХ ( $P < K_k$ ), КРИТИЧЕСКИХ ( $P < P_{kp(k)}$ ) И РЕДУЦИРОВАННЫХ ( $P < P_{pk}$ ) ПРИ  $\forall k \in \{1, 5\}, E = E_c \sqrt{\lambda} E_0, \varepsilon = E/U_{a.o.}$  ИЛИ  $\lambda, \Pi = 12, \Pi_{pk} = 24, K_{\text{min}} \leq K_{pk}$

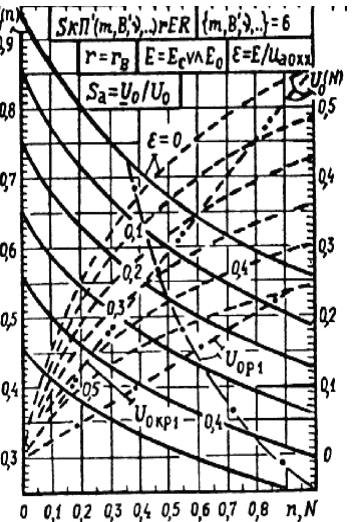


Рис. 3. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ НОМОГРАММЫ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ  $U_0$  ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ  $U_0$  ПРИ  $0 \leq U_a \leq U_0$  ИЛИ УДР РЕЗИСТИВНЫХ ВС КЛАССА  $SK\Pi(m, B, \gamma, \dots) rR$  ПРИ РАБОТЕ В  $k$ -Х КОММУТАЦИОННЫХ, КРИТИЧЕСКИХ И РЕДУЦИРОВАННЫХ РЕЖИМАХ ПРИ  $\Pi = 6; 12$

## А Н Н О Т А Ц И Я

В отчёте отражены основные результаты 2 этапа НИР по теме "Новый метод инженерного синтеза вентильных схем с индуктивными фильтрами и внутренними индуктивностями" (метод "Цикл").

Этап является промежуточной стадией НИР, выполняемой в целом по теме "Исследование электромагнитных процессов вентильных структур с фильтрами". НИР проводится в составе работ по заказам предприятия.

По форме отчёт составлен в соответствии с ОСТ4.091.020 "Документация отчётная научно-техническая", а также "Положением о порядке проведения НИР и ОКР в НПО "Фазатрон"". Отчёт представлен в виде одной книги, объединяющей основной текст, таблицы, номограммы и библиографию.

По содержанию отчёт включает: актуальность проблемы и постановку задачи; анализ современного состояния вопроса; достоинства и недостатки существующих методов синтеза вентильных схем рассматриваемого класса; изложение принципиально нового эффективного метода, обеспечивающего простоту и замкнутость расчётного цикла; простые и удобные для практики аналитические способы оценки критических состояний схем, обладающие существенными достоинствами по сравнению с экспериментальными способами; примеры распространяемости предложенного принципа замкнутости на многие другие технические применения, используемые практически во всех технических отраслях народного хозяйства страны.

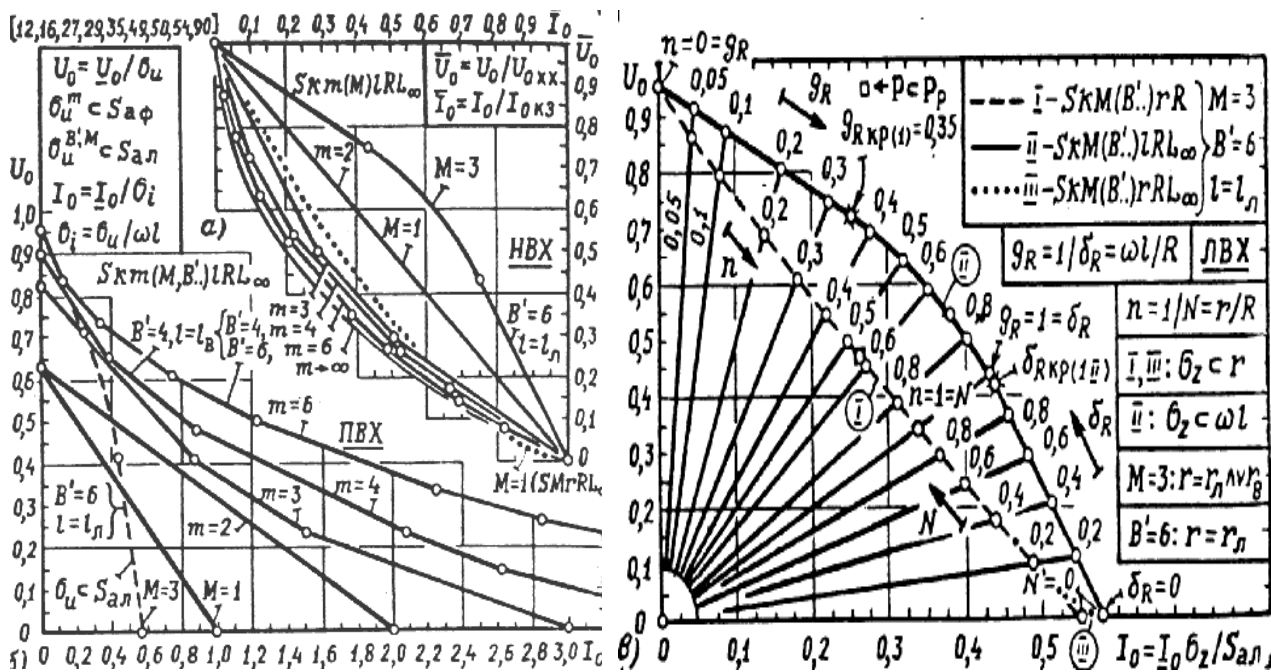


Рис. 4. Универсальные нормированные (НВХ) (а), приведенные к основанию (ПВХ) (б) и лучевые (ЛВХ) (в) внешние характеристики  $m$ -лучевых,  $M$ -фазных мостовых (с  $\Delta$ -ячейковыми вентильными мостами), кольцевых (с  $B'$ -вентильными кольцами),  $O$ -,  $V$ -,  $C$ - и подобных схем классов  $S_{km}(m, B', \dots)lRL_{\infty}$ ,  $S_{km}(B')$ ,

$\dots)rRL_{\infty}$  и  $S_{km}(B', \dots)rR$  при работе в коммутационных режимах I и II рода  $k$ -го и  $k_{II}$ -го порядка при  $\{i, m\} = 1, 2, 3, 4, 6$ ,  $M = 1, 3$ ,  $B' = 4, 6$ ,  $\epsilon = 0$ ,  $k = 1, k_{II} = 1, k_{II} = 1$ ;  $\{k_{II} = m - 1, k_{II} = m - 2\}$ ,  $V[m, B']$ ;  $\{k_{II} = 2, k_{II} = 1\}$ ,  $M = 3, B' = 6$ ;  $\square - P_p$  РЕЖИМ:  $n = n_p = r/R = 1/\sqrt{3}$

Реферат

Изложены основополагающие результаты, обеспечивающие простоту и эффективность инженерного синтеза вентиляльных преобразователей с фильтрами индуктивного характера при учёте внутренних индуктивностей и работе схем во всём диапазоне нагрузок — от режима холостого хода до режима короткого замыкания.

Показана технико-экономическая полезность использования результатов в целом ряде промышленных отраслей страны.

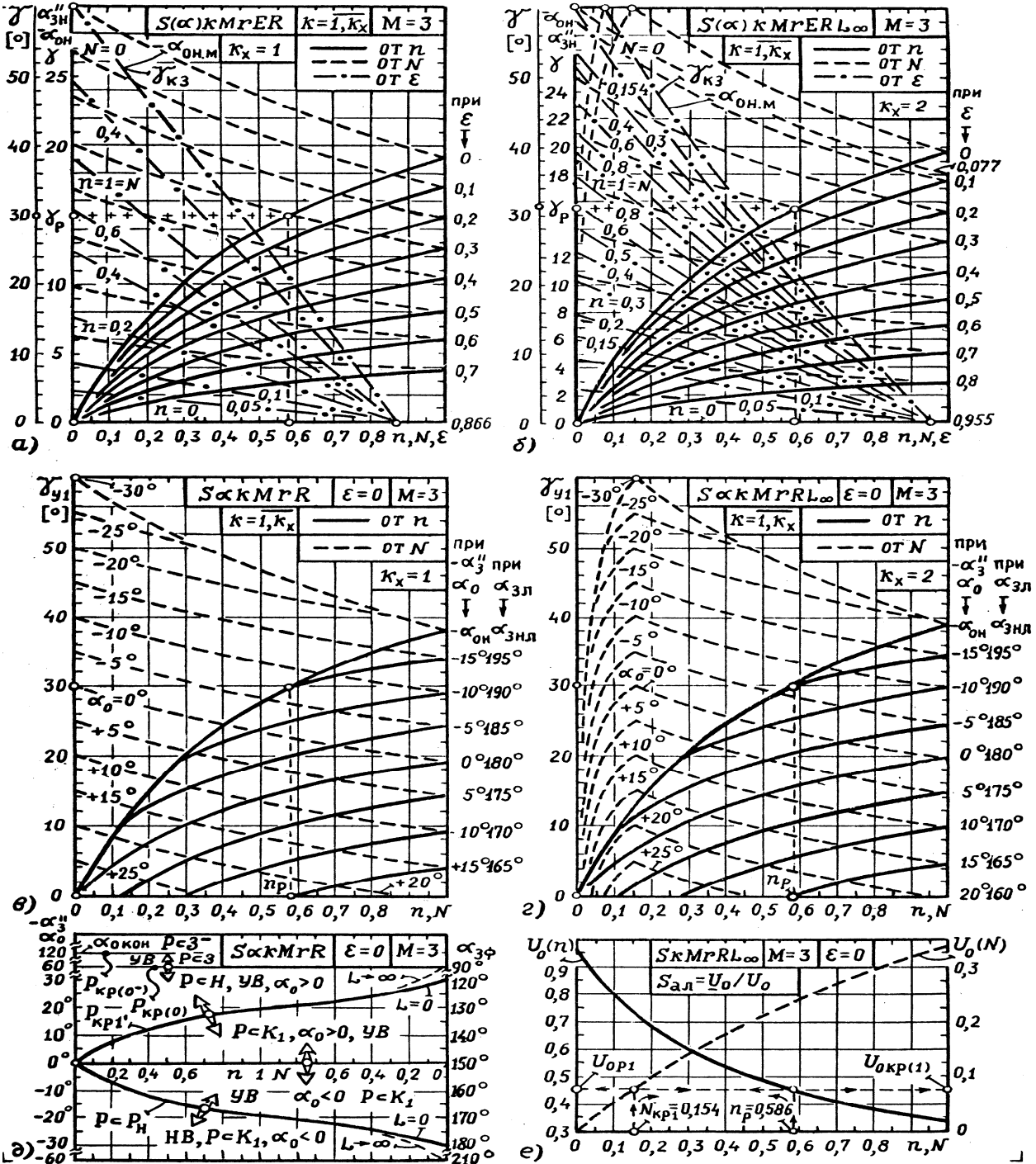


Рис. 5. Универсальные параметрические номограммы углов коммутации, начальных значений углов управления (а...г) и среднего напряжения нагрузки (е), режимный портрет (д) неуправляемых (НВ) (а,б,е) и управляемых (УВ) (в,г,д) резистивных (а,в,д) и с катодным реактором (б,г,е) ВП с 3-ячейковым (М3, УМ3,...) мостом (либо с 6-вентильным кольцом В'6, ВВ'6Р [11] и т. п., если  $r = r_l$ ) с учетом активных потерь (а...е) и противоЭДС (а,б) и при значениях  $\epsilon = [0; 1]$ ;  $\{n, N\} = [0, \infty]$ ;  $\alpha_0 = [-60^\circ; 120^\circ]$ ;  $\alpha_3 = [0; 240^\circ]$ ,  $k = 1, k_x$ ; на рис. 5, а, б:  $\gamma$ ,  $\gamma = \gamma/2$  — для НВ;  $\{-\alpha_{OH}, \alpha_{3л}\}$  — для УВ;  $\epsilon = E/S_{эл}$ ,  $E = E_{в\Delta E_0}$ , причем при  $\alpha_3 \geq \alpha_{3л}$ ,  $\alpha_3 \geq \alpha_{3л}$ ,  $\alpha_0 \leq -\alpha_{OH}$ ,  $\alpha_0 \leq -\alpha_{OH}$  управляемые ВП неуправляемы (д);  $\vee, \wedge$  — знаки "и", "или";

С о д е р ж а н и е

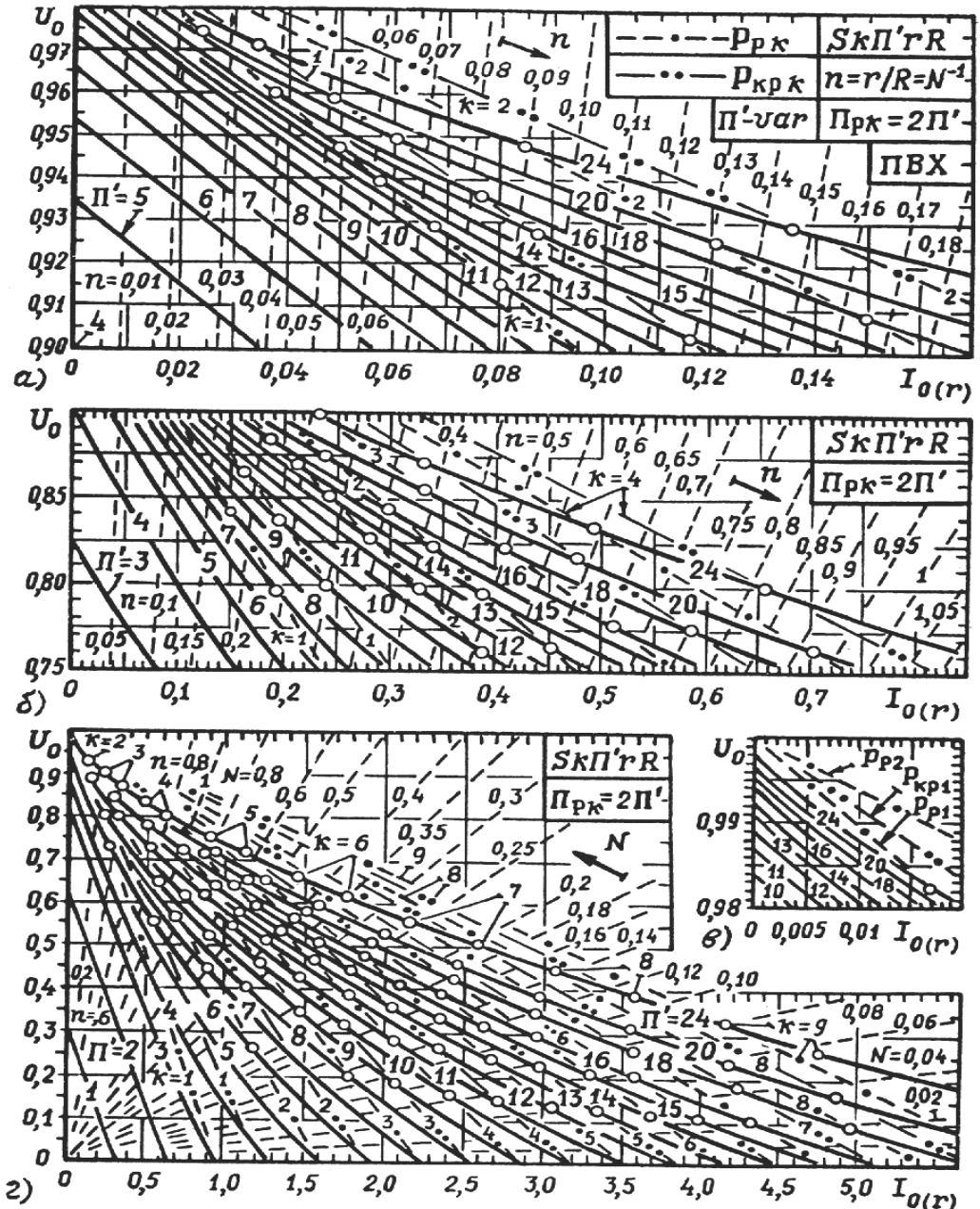
№ п/п	Наименование	стр.
1	Аннотация	2
2	Реферат	3
3	Содержание	4
4	Перечень условных сокращений	6
5	Предисловие	7
6	Актуальность тематики	9
7	Основные предпосылки и класс рассматриваемых схем	10
8	Достоинства и недостатки приёма $L \rightarrow \infty$	12
9	Замкнутые соотношения и их эффективность	15
10	Критические параметры и режимы II рода	19
11	Режимно-энергетические параметры схем	20
12	Некоторые важные обобщения и замечания	23
13	Выводы	30
14	Литература	31
15	Приложения	
	Таблица 1. Зависимость обобщённой постоянной времени $g_R = \omega l / r$ от половины угла коммутации $\gamma_k$ в $k$ -м режиме работы	34
	Таблица 2. Значения условных напряжений холостого хода и токов короткого замыкания для $k$ -х режимов	34
	Таблица 3. Зависимости напряжений $U_{0(k)}$ и $\bar{U}_{0(k)}$	35
	Таблица 4. Критические значения величин для $k$ -х режимов	36

№ п/п	Наименование	стр.
	Таблица 5. Критические значения увеличим для $k_{II}$ -х режимов	36
	Рис.1. Незамкнутые номограммы угла коммутации, опубликованные в литературе	37
	Рис.2. Замкнутые номограммы угла коммутации, разработанные по методу "Цикл"	37
	Рис.3. Замкнутые номограммы среднего напряжения полезной нагрузки, разработанные по методу "Цикл"	38
	Рис.4. Приведенные к основаниям (ПВХ) и нормированные (НВХ) внешние характеристики	39
	Рис.5. Зависимости универсальных функций, гармонических составляющих, коэффициентов сдвига, искажений и мощности от угла коммутации	39
	Рис.6. Замкнутые параметрические номограммы для однофазной мостовой схемы, разработанные по методу "Цикл" с использованием ЭВМ	40

## Перечень условных сокращений

- РЭА — радиоэлектронная аппаратура
- ВИП — вторичные источники электропитания
- ВП — вентиляные преобразователи электрической энергии
- АД — асинхронный двигатель
- АВК — асинхронно-вентильный каскад
- ВГ — вентильный генератор
- ИЕП — индуктивно-ёмкостный преобразователь
- ВХ — внешняя характеристика
- ПВХ — приведенная к основаниям внешняя характеристика
- НВХ — нормированная внешняя характеристика

Рис. 8. Суперуниверсальные ВХ (г) и их увеличенные фрагменты (а, б, в) в приведенных к основаниям единицах (ПВХ  $U_0(I_0(r))$ , сплошные линии) резистивных вентильных схем класса  $Sk\Pi'rR$  ( $\lambda, m, \nu, k' // \Pi_k', \dots$ ) —  $rR$  с  $\Pi' = k' \Pi_k'$ , кратной частотой пульсации ( $m$ -фазные,  $\lambda$ -лучевые,  $\nu$ -вентильные кольцевые, дикоптированные на  $k'$  параллельно соединенных (через  $r_k'$ ) фазосдвинутых подсхем с  $\Pi_k' = \Pi' / k'$  частотной кратностью пульсации,  $V$ -,  $O$ - и другие интегрированные или несомещенные схемы с одним вентильным плечом в каждом из  $\Pi'$  циклически сменяющихся во времени контуров токопротождения) при работе в коммутационных, редукционных и критических режимах  $k$ -го порядка и при  $\Pi' = 1, 2, 4$  (большие целые на ПВХ),  $k = 1, 9$  (малые целые),  $\{n = r/R, N = 1/n\} = [0; 1]$  (малые десятичные),  $\theta_u \leq U_{a.o.идлхх}$ ,  $\theta_z \leq r$ ,  $\theta_i = \theta_u / \theta_z = \theta_u / r$ ,  $U_0 = U_o / \theta_u$ ,  $I_0(r) = I_o / \theta_i$ ,  $\varepsilon = 0$ ; (---) — линейные лучевые ВХ (ЛВХ) при фиксированных  $\{n, N\} \in [0, \infty]$ , работе схем от ХХ до КЗ нагрузки  $R$  или  $r$ ; - - - — линейные от  $\Pi'$  характеристики для одноименных по  $k$  редукционных состояний  $P \subset P_{pk}$  с  $P_k$ -явлениями; - . . - — то же для  $k$ -х критических состояний  $P \subset P_{кр(k)}$ )





## Предисловие

Существующие способы инженерного синтеза вентильных преобразователей энергии (ВП) с фильтрами индуктивного характера основаны на использовании расчётных соотношений, зависящих от угла коммутации  $\gamma$ . В связи с отсутствием замкнутых уравнений для  $\gamma$  все известные из мировой литературы методы синтеза, основанные на условном допущении  $L \rightarrow \infty$ , страдают неопределённостью, что приводит при разработке таких устройств к принципиальной невозможности оптимизировать по замкнутому циклу массо-габаритные показатели аппаратуры, как следствие, к произвольно завышенным весу и объёму изделий, необходимости проведения различных отладок, доводок и экспериментов, как правило дорогостоящих и трудоёмких.

Отсутствие замкнутых уравнений для  $\gamma$  не позволяет решить аналитическими способами проблемы электромагнитной совместимости ВП с остальной аппаратурой, оценки уровня радиопомех, создаваемых преобразователями, определения типа режима схем и обусловленных этим режимно-энергетических состояний ВП, оценки перехода схем из одних физических состояний в другие и т.д.

В данной работе все эти пробелы устранены. В частности даны в рекуррентной форме замкнутые соотношения для углов коммутации и основных режимных показателей схем при их работе в любом  $k$ -м коммутационном режиме. На их основе разработаны параметрические номограммы, которые, будучи построенными по решениям на ЭВМ, обеспечивают замкнутость цикла расчётов и, следовательно, более высокое качество разработок ВП, снижение трудоёмкости и сроков выпуска изделий и создание условий для достижения оптимальных массо-габаритных показателей схем рассмотренного класса в процессе их инженерного синтеза.

Таким образом, можно считать, что существовавшая более полувека

проблема  
 решена полностью применительно к рассмотренному в работе классу схем. Одновременно показана фундаментальность предложенного принципа замкнутости, его распространяемость на многие другие классы вентильных структур, а также на принципиально иные технические устройства и агрегаты, такие, например, как инвертеры, авиационные вентильные генераторы, асинхронные вентильные каскады, индуктивно-ёмкостные преобразователи и т.п.

**Repin A.M. / А. М. Репин. *The simple mathematic closed formulas for elaborate of the ventil electrical circuits of the model class*  $S(E) k m (L) \{ R L \infty$ . Простые замкнутые соотношения для проектирования вентильных схем класса  $S(E) k m (L) \{ R L \infty$ . // Научный электронный архив.**

**URL: <http://econf.rae.ru/article/6638>** (дата обращения: 24.04.2012).

**The simple mathematic closed formulas for elaborate of the ventil electrical circuits of the model class  $S(E) k m (L) \{ R L \infty$ . Простые замкнутые соотношения для проектирования вентильных схем класса  $S(E) k m (L) \{ R L \infty$  Repin A.M. / А. М. Репин**

**поступило 23-03-12 08:16**

### Актуальность тематики

При современных успехах миниатюризации РЭА источники электропитания стали занимать /по опубликованным данным/ от 30 до 80 % общего объёма и массы устройств. Такое критическое положение возникло не только потому, что силовая часть ВПИ менее всего поддается миниатюризации методами интегральной техники, но также /как справедливо отмечается в [1]/ из-за сложившихся десятилетиями неправильных представлений о ВПИ как о простых и второстепенных по значению устройствах.

В связи с этим чрезвычайно актуальной стала в настоящее время проблема улучшения массо-габаритных показателей ВПИ, и, в первую очередь, ВП, являющихся основными силовыми устройствами по доминирующей доле их массы и объёма.

Неиспользованным резервом здесь является повышение качества и надёжности разработок ВП путём создания и использования эффективных методов их инженерного синтеза. Свидетельством тому – активное внимание специалистов ведущих стран мира разработке научно-обоснованных способов инженерного проектирования. Это, в свою очередь, требует выполнения обширных исследовательских работ по глубокому и всестороннему изучению электромагнитных процессов в ВП, проводимых на достаточно серьёзной научной основе с привлечением высококвалифицированных научных и инженерных кадров, тонких аналитических и машинных методов и современных средств вычислительной техники.

В данной работе изложены новые возможности инженерного синтеза ВП

с нагрузкой индуктивного характера, полученные на основе проведённых автором многолетних изысканий. Путём предварительной формулировки исходных предпосылок определён класс рассматриваемых структур ВП, дана краткая оценка достоинств и недостатков существующих методов [2-14], приведены в компактной форме необходимые для разработчиков сведения, в том числе простые рекуррентные соотношения и рассчитанные на ЭЦВМ номограммы, сделаны обобщения и поставлены новые перспективные задачи.

#### Основные предпосылки и класс рассматриваемых схем.

Согласно принятым в [15-18] обозначениям в данной работе рассматриваются схемные структуры ВП класса  $Sk_m(M)RL_{\infty}$ , объединяющие совокупность  $m$ -фазных лучевых и  $M$ -фазных мостовых вентильных схем с нагрузкой индуктивного  $/RL/$  характера при синусоидальных фазных эдс  $S_{\mu}$  с начальными фазами  $\psi_{\mu}$ , амплитудами  $S_{a\mu}$  и частотами  $\omega_{\mu} = 2\pi f_{\mu}$  при соблюдении симметрии внутренних ветвей:  $S_{a\mu} = S_a$ ,  $l_{\mu} = l$ ,  $f_{\mu} = f$ ,  $\psi_{\mu} = (\mu - 1)2\theta$ , где  $\mu = \overline{1, m}$  - текущий номер внутренней ветви /фаз трансформатора, вентиля и пр./,  $\theta = \pi/m$  - полпериода огибающей фазных эдс,  $k = \overline{1, k_x}$  - номер коммутационного режима [2-38].

Наряду с  $S_{\mu}$   $\mu$ -я внутренняя ветвь содержит индуктивность  $l_{\mu}$  сопротивлением  $x_{\mu} = \omega_{\mu} l_{\mu} = x = \omega l$ , представляющей в дальнейшем суммарное значение всех индуктивностей, относящихся к  $\mu$ -й фазе, а именно:

- приведенных к вторичной стороне трансформатора индуктивностей рассеяния его первичных и вторичных обмоток,
- индуктивности питающей сети или источников входных воздействий /эдс, сигналов и пр./, также приведенной к стороне постоянного тока,
- индуктивности короткого замыкания асинхронного двигателя /в случае использования вентильных каскадов для регулирования скорости АД/,
- индуктивности шин соединения трансформатора с вентильным звеном, а также последнего с нагрузкой /в случае высокочастотных или сверхмощных ВП
- индуктивности делителей тока вентиля /в случае использования уравнительных дросселей/ и т.п.

В литературе эти случаи рассматривают обычно отдельно. Однако их можно объединить в силу математической общности уравнений, описывающих физические состояния схем.

Под нагрузкой индуктивного характера будем понимать одно- или многозвенный фильтр, в качестве первого элемента в продольной ветви которого установлен линейный дроссель  $L$ . ВП с такими фильтрами широко используют в ВП разнообразной радиоэлектронной аппаратуры /наземной, например центра управления космическими аппаратами или других наземных радиокомплексов; подвижной, например судовой; бортовой, например космической, авиационной; и т.п./, в ВП устройств связи /например, на радиопередающих центрах, узлах связи и пр./, различной телевизионной, радиолобительской и специальной аппаратуры, а также в разнообразных агрегатах питания процессов электролиза /например, в цветной металлургии, химической промышленности, гальванотехнике/, в устройствах возбуждателей турбогенераторов, в многочисленных системах электропривода, в вентильных устройствах тяговых подстанций, железнодорожного транспорта, в системах передачи электроэнергии на большие расстояния и т.д. [2-38].

Таким образом, как по внутренней, так и по нагрузочной частям ВП в дальнейшем рассматривается чрезвычайно распространенный и вместе с тем обобщенный случай, объединяющий бесчисленное множество частных практических применений.

Переменная составляющая или пульсация выходного тока ВП /тока общей нагрузки  $i_H$ / обычно настолько снижена фильтром, что в большинстве случаев ею можно пренебречь при математическом анализе процессов по сравнению с средним током  $I_0$  полезной нагрузки  $R$ . Следовательно, можно принять  $i_H = I_0$ . При строгом подходе это равносильно гипотетическому условию  $L \rightarrow \infty$ , однако в действительности оно проявляется уже при  $\omega L / R > 2+5$ .

Так как на практике обычно  $\omega L \gg R$  [2-14, 19, 29-38], результаты анализа схем при  $L \rightarrow \infty$  оказываются справедливыми для многих реальных применений. В обозначении рассматриваемого класса схем принятое допущение подчеркивается для краткости символом  $L_\infty$ .

### Достоинства и недостатки приёма $L \rightarrow \infty$

Хотя упрощающий прием  $L \rightarrow \infty$  был предложен еще в 20-х годах для случая чисто индуктивной нагрузки [2], допущение  $i_H = I_0$  до сих пор является основополагающим во всей отечественной и зарубежной литературе [4-19, 29-38]. Такую стабильность можно объяснить рядом приобретаемых от этого ценных достоинств. В частности, при  $L \rightarrow \infty$  удаётся:

- 1/ заменить любой сложности фильтр одним дросселем  $L_\infty$ ,
- 2/ исключить из рассмотрения все реактивные элементы фильтра, в том числе  $L$ ,
- 3/ резко понизить порядок дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в схемах, что важно уже само по себе даже при анализе линейных цепей, но особенно ценно для схем ВП и без того весьма сложных для анализа из-за наличия в них многих нелинейных элементов /вентилей/,
- 4/ тем самым, существенно упростить математическое описание явлений в ВП и, как следствие, методику их инженерного синтеза.

Условие  $L \rightarrow \infty$  позволяет, кроме того, получить в явном виде уравнения внешних характеристик, являющихся одними из важнейших для любых преобразователей энергии /генераторов, выпрямителей, стабилизаторов и пр./, что при конечных  $L$  получить принципиально не удастся.

В этом заключены основные достоинства приёма  $L \rightarrow \infty$ , которому присущи однако и недостатки. Один из них долгое время оставался непреодолимым, что сдерживало достаточно качественную разработку схемных структур ВП. С целью выявления полезности приведенных далее результатов, свободных от многих минусов, ставших традиционными, а также из-за отсутствия в литературе необходимых по ним сведений, рассмотрим подробнее сущность и негативные последствия указанного недостатка.

Инженерный синтез любых схем ВП основан на поиске их режимно-энергетических показателей: амплитудных, средних, действующих значений токов,

напряжений, мощностей в элементах схем, а также спектров входного тока, тока вентиля, выходного напряжения, величины магнитного момента или напряженности поля, создаваемого ВП в окружающем пространстве, коэффициентов потерь, полезного действия, использования трансформаторов, вентиля, фильтров, искажения первичного тока, мощности ВП, текущих относительных характеристик и т.д. Все они зависят от так называемого угла коммутации или "перекрытия"  $\gamma$ .

Применительно к первому коммутационному режиму угол  $\gamma$  определяет длительность подынтервала одновременной работы двух внутренних ветвей. В этом случае уравнение для  $\gamma$ , полученное еще в 20-х годах [2,3], имеет в поясненных выше обозначениях следующий вид

$$/ 1 / \quad 1 - \cos \gamma = \frac{x \underline{I}_0}{S_a \sin \theta} .$$

Из /1/ следует, что угол  $\gamma$  зависит от пяти величин:  $m, S_a, \underline{I}_0, f, l$ . При решении задачи анализа, когда элементы схемной структуры ВП известны /то есть известны  $m, x, S_a$ /, выражение /1/ представляет собой ур-е с двумя неизвестными / $\gamma$  и  $\underline{I}_0$ /.

Так как ток  $\underline{I}_0$ , как искомая при анализе переменная, является функцией угла  $\gamma$ , то ур-е /1/, как всякое ур-е с двумя неизвестными, дает бесчисленное множество решений. Страдая в связи с этим неопределенностью, ур-е /1/ является в математическом смысле незамкнутым относительно  $\gamma$ . Поэтому в литературе /см., например, рис.1 [2,5,35,36,38]/ графики для  $\gamma$  приводят либо от безразмерных, но неопределенных отношений  $x \underline{I}_0 / S_a$  [2,5,10,11 и др.] или  $x \underline{I}_0 / S_a \sin \theta$  [36 и др.] или /в полярных координатах/  $\mathcal{P} = \underline{P} / \mathcal{O}_p$  и  $Q' = Q' / \mathcal{O}_p$  (где  $Q' = Q - 3\gamma / 2\pi$ ,  $Q = Q / \mathcal{O}_p$ ,  $\mathcal{O}_p = 3S_a^2 / 2x$ ,  $\underline{P}$  и  $Q$  - активная и реактивная мощности, зависящие от тех же  $m, S_a, f, \underline{I}_0$ ) [35], либо от размерных значений тока  $\underline{I}_0$  для конкретных частных значений входных и выходных данных /числа, частоты и амплитуды эдс, тока и напряжения нагрузки и пр./ [38 и др.].

Неудобства практического пользования и нерентабельность таких способов очевидны, ибо в одних случаях поиск  $\gamma$  связан с неопределеннос-

тью, а в других – с чрезвычайной трудоёмкостью, объёмностью и громоздкостью многочисленных номограмм при попытке перекрыть хотя бы небольшую часть встречающихся на практике данных. В любом случае изменение данных или типа схемы требует <sup>новых</sup> затрат на эксперимент, которые, будучи многократно помноженными на бесчисленное количество конкретных разработок ВП, оказываются весьма значительными.

Вместе с тем, в [38] /см. рис.1/ и многих других подобных работах показано хорошее совпадение расчётных данных с экспериментом, что, с одной стороны, предопределяет статистическую ценность этого фактического материала, а с другой – свидетельствует о практической приемлемости и достаточной достоверности использования расчётных соотношений, приводимых далее. Связанное с этим исключение натуральных испытаний обеспечивает существенный методологический, экономический и социальный эффект.

При синтезе схем ВП  $m$ ,  $\underline{I}_0$  и  $f$  /иногда  $l$  / обычно заданы, и, значит, ур-е /1/ вновь содержит два неизвестных /  $\gamma$  и  $S_a$  /.

В случае работы схем в иных, более сложных режимах ситуация аналогична. Таким образом, отсутствие замкнутых ур-й для  $\gamma$  приводит к неопределённости как при анализе, так и при инженерном синтезе схем. Это, уже в основе своей, предопределяет низкое качество разработок, необходимость многочисленных и трудоёмких экспериментальных доводов и предварительных натуральных исследований, что в свою очередь требует дорогостоящих специальных стендов, оборудования и площадей, профессиональных навыков, опыта и интуиции, приводит к произвольному завышению расходов ценных материалов, дополнительному износу оборудования и т.п.

На практике в подобных случаях вынуждены прибегать к различным искусственным приёмам, приводящим, однако, к весьма произвольным массо-габаритным показателям с трудно контролируемой достоверностью.

Естественным следствием такого положения являются значительные экономические потери, особенно ощутимые в пересчёте на многие промышленные отрасли или рассматриваемые в масштабах страны либо группы стран, например, стран экономической взаимопомощи.

Приводимые ниже сведения обеспечивают замкнутость инженерного синтеза многих структур ВП и тем самым устраняют отмеченные выше пробелы.



### Замкнутые соотношения и их эффективность

Для упрощения и удобства изложения половина угла коммутации  $\gamma$  обозначена далее через  $\chi$ . Замкнутые ур-я для  $\chi$  представлены в компактной, справочной форме, удобной для инженера-разработчика. С целью сокращения ур-я сведены в табл.1. Результаты даны для наиболее распространенных в радиоэлектронике 2,3,4,6-фазных лучевых и 1,3-фазных мостовых схем при их работе во всём диапазоне нагрузок - от  $x/R \rightarrow \infty$  до  $k/R \rightarrow 0$ .

Наряду с замкнутостью соотношений их отличительным и уникальным свойством является зависимость угла  $\chi$  всего лишь от одного обобщенного параметра схем  $g_R = x/R$ .  $g_R$  представляет собой обобщенную постоянную времени данного класса схем, а инверсная ей величина  $\delta_R$  - обобщенный декремент затухания.

Таким образом, в отличие от всех известных из литературы методов угол коммутации по излагаемой методике может быть однозначно и легко определен независимо от конкретных значений мощности, напряжений, токов нагрузки, амплитуды, частоты и мощности питающих источников, сложности фильтров и конкретной применимости схем /в ВИП РЭА, в вентильных каскадах АД, в электролизе, электроприводе и пр./ . При этом важно также отметить, что ур-я для  $\chi$  даны в табл.1 не только для первого коммутационного режима схем / $k = 1$ /, которому соответствует классическое соотношение /1/, но также для любых  $k$ -х состояний ВП, которые для краткости обозначаются далее в виде  $P = K_k$ , где  $k = \overline{1, k_x}$  / $k_x = m^- = m - 1$ , - номер режима [2-19]. При этом под  $k$ -м будем понимать такое состояние схем, при котором период процессов содержит два подынтервала коммутации:  $k$ -й и  $k^-$ -й, внутри которых одновременно работает соответственно  $k^+$  и  $k$  внутренних ветвей, где  $k^\pm = k \pm 1$ .

Обычно в подобных случаях изучают каждый режим в отдельности и, как

правило, по каждой схеме [7-15, 19, 32-38], что очень трудоемко и требует большого печатного объема. Рекуррентность приводимых ниже соотношений, из которых можно получить частные формулы не только для схем, указанных в табл.1, но для любых иных  $m$ -фазных схем, позволяют избежать отмеченных минусов при изучении схемных структур ВП класса  $SkmlRL_{\infty}$  [16-18].

Ур-е для  $\gamma_k$

$$/2/ \quad A(\gamma_k)B(\gamma_k) = \frac{k^2 \theta A_k^2}{k^+(k^+ \theta + g_R)} ; \quad \gamma_k = f(m, k, g_R), \quad ||$$

где

$$/3/ \quad A_k = \sqrt{A'_k}, \quad A'_k = 1 - 2a_k \cos k^+ \theta + a_k^2 = f(m, k), \quad |$$

$$/4/ \quad a_k = \sin k \theta / k \sin \theta = f(m, k), \quad a_{k^+} = \sin k^+ \theta / k^+ \sin \theta = f(m, k) \quad |$$

свободны от угла  $\gamma_k$  и начального момента  $\psi_k$  открытия вентиля, а функции

$$/5/ \quad A(\gamma_k) = a_{k^+} \sin \gamma_k + a_k \sin(\theta - \gamma_k) = f(m, k, \gamma_k), \quad |$$

$$/6/ \quad B(\gamma_k) = \sin(\gamma_k + k \theta) - a_{k^+} \sin \gamma_k = f(m, k, \gamma_k) \quad |$$

выражены только через  $\gamma_k$  при данных  $m, k$  и при любых  $k = \overline{1, k_x} < m$ ,  $m = \overline{2, \infty}$  также независимы от  $\psi_k$ .

В свою очередь угол  $\psi_k$  находится тоже весьма просто

$$/7/ \quad \operatorname{tg} \psi_k = a_k \sin k^+ \theta / (1 - a_k \cos k^+ \theta) = f(m, k), \quad |$$

поскольку его расчёт не связан с предварительным определением угла коммутации и не зависит от конкретных значений мощности, напряжения или тока нагрузки.

Выражение для среднего значения выходного напряжения

$$/8/ \quad U_{o(k)} = \frac{k^+ A(\gamma_k) B(\gamma_k)}{k \theta A_k} = f(m, k, \gamma_k),$$

дающее для первого режима общеизвестное соотношение [2, 6, 8, 10-12, 19, 36]

$$/8'/ \quad U_{o(1)} = \sin \theta (1 + \cos \gamma) / 2 \theta \quad ,$$

благодаря замкнутому ур-ю /2/ тоже приобретает чрезвычайно простой вид

*Продолжение следует*

© А.М. Репин. 1971, -77, -78, -83, -86, -91, 24.11.2011, 9.5.12. 1.6.12