

Анонс. Для широкого класса схем вентиляльных конвертеров электроэнергии с нагрузкой индуктивного характера даны в компактном виде **новые простые соотношения** и **наглядные параметрические номограммы**, **облегчающие труд исследователя и разработчика**. Результаты **полезны** также для **методических** и **учебных** целей. Особенно в связи с **отсутствием** до сих пор в научной, учебной и инженерно-технической литературе.

Предисловие. Впервые предлагаемый в электронной версии материал (в виде скан-копий 10.7.2006 г.) двух взаимосвязанных статей подготовлен в 1977 г. На основе ранее выполненных автором научных исследований. Коррелируемые по содержанию с научным отчётом «Новый метод инженерного синтеза вентиляльных схем с индуктивными фильтрами», М.: НИИР, Минрадиопром СССР. 1978 (ИЗДА. URL: <http://econf.rae.ru/article/6859>. ..16860), эти статьи представлены в апреле того же 1978 года в редакцию научно-технического сборника «Вопросы радиоэлектроники (ВРЭ)» МРП СССР. Но из-за активности тормозителей (об историзмах, вероятно, будет, при возможности, добавлено в приложении) подправленные рецензентом и редактором материалы опубликованы, лишь спустя 5 лет. В 1983 г.

По **содержанию** и **форме** (за исключением опечаток, качества печати, пр.) материалы – **авторские**. Мною вписаны все знаки, обозначения, лично полученные математические формулы. По результатам расчётов на ЭВМ (по составленным мною алгоритмам) выполнены все **изображения: таблицы, электрические схемы, формы токов, напряжений, графики, фрагментированная блок-схема машинной программы**, пр. А также **дизайн**.

Всё это – не уровня пресловутого “чёрного квадрата”. Треугольника. Параллелограмма. Известных с древних времён. До нашей эры. До Рождества Христова. Вновь изображённых, тысячелетия спустя. И хранящихся, как шедевры, в музее. Третьяковке.

Мои **изображения** в сравнении – своего рода **искусство**. Арт. **Художество**. **Графика**. **На научной основе**.

Причём первоначально – наброски, эскизы на бумаге. Затем на миллиметровке. На кальке. И с калек, наклеенных мною на ватман, – фотографирование (при моём участии) на соответствующие по размерам фотоплёнки. С них – травление на металлические пластины (в цехе, без участия автора). С пластин – печать на бумагу (при участии в просмотре некоторых фрагментов). Тиражирование сборника (разумеется, без участия). Наконец, распечатка подарочных экземпляров только статей автора (тоже без него). И вручение их ему. Что, естественно, уже при наличии. И что ... самое приятное. **Ощутить тепло новоиспечённых в бумажном издании результатов собственных трудов. Почувствовать тепло рук и человечности душ всех причастных к рождению новоявленца.**

Фрагменты из материалов автора:

Замкнутое уравнение для угла коммутации при работе m -фазной схемы в любом k -м режиме:

$$\| A(\gamma_k) B(\gamma_k) = \frac{k^2 \theta A'_k}{k^+ (k k^+ \theta + g_R)} ; \quad \gamma_k = F(m, k, g_R);$$

$$\gamma_{k^-} = 2\theta - \gamma_k ,$$

$$A(\gamma_k) = a_{k^+} \sin \gamma_k + a_k \sin (\theta - \gamma_k) = F(m, k, \gamma_k);$$

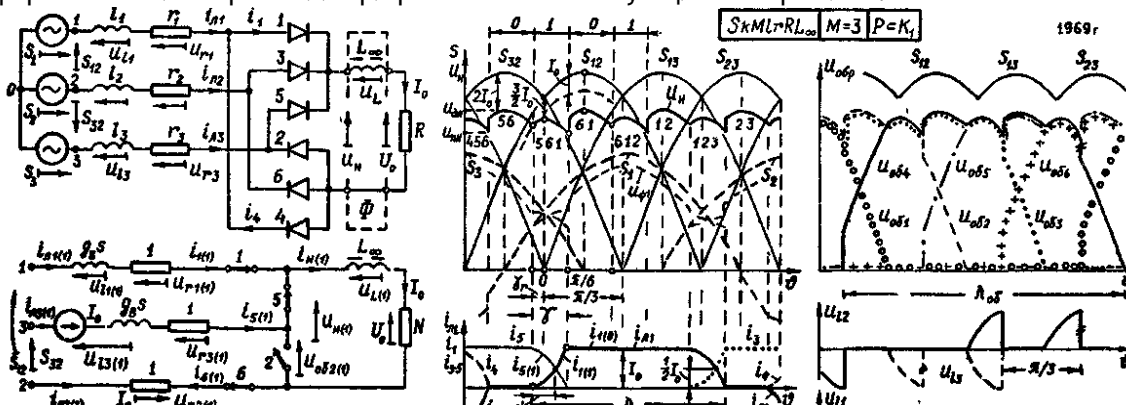
$$B(\gamma_k) = \sin (\gamma_k + k\theta) - a_{k^+} \sin \gamma_k = F(m, k, \gamma_k)$$

$$A_k = \sqrt{A'_k} ; \quad A'_k = 1 - 2a_k \cos k^+ \theta + a_k^2 = F(m, k); \quad k^{\pm} = k \pm 1,$$

$$a_k = \text{mod } \frac{1}{k} \sum_{\mu=1}^k S_{\mu}(\vartheta) |_{\vartheta=\omega t \in [\gamma_k, 2\theta]} = \sin k\theta / k \sin \theta ;$$

$$a_{k^+} = \text{mod } \frac{1}{k^+} \sum_{\mu=1}^{k^+} S_{\mu}(\vartheta) |_{\vartheta \in [0, \gamma_k]} = \sin k^+ \theta / k^+ \sin \theta$$

Эквивалентная схема **3-фазного мостового конвертера** и формы токов и напряжений при работе в 1-м коммутационном режиме:



~~Лисов~~
~~МД 27.9.83~~

Вопрос разложения формул
сер. ОБИ
1983, Вып. 8, с. 44-61

$S \in m(M) \subseteq RL_{\infty}$
 $P \subseteq K_k$
 $P \subseteq K_{n\bar{u}}$

УДК 621.314.6:621.382

А. М. Репин

НОВЫЙ МЕТОД ИНЖЕНЕРНОГО СИНТЕЗА ВЕНТИЛЬНЫХ СХЕМ
КЛАССА $S k m (M) L R L_{\infty}$

Для широкого класса схем с нагрузкой индуктивного характера даны в компактном виде новые простые соотношения и наглядные параметрические номограммы, облегчающие труд исследователя и разработчика. Результаты полезны также для методических и учебных целей.

Актуальность вопроса, исходные предпосылки и цель

Основное внимание в области исследований и разработок вторичных источников электропитания (ВИП) РЭА в настоящее время сосредоточено на эффективности, качестве и надежности анализа и инженерного синтеза ВИП, их унификации, миниатюризации, оптимизации [1-3, 17].

Ниже приведены новые унифицированные результаты исследования широкого класса практических схем вентильных преобразователей энергии (ВП) с индуктивными фильтрами и внутренними индуктивностями при их работе во всем диапазоне нагрузок - от холостого хода (ХХ) до короткого замыкания (КЗ). Приводимые результаты отличаются от известных математической замкнутостью, наглядностью и удобством использования благодаря исключению из цикла многочисленных расчетных и экспериментальных процедур наиболее ответственного этапа - определения угла коммутации γ .

Именно на определение γ направлены на практике основные усилия исследователей и разработчиков ВП [4-16], поскольку в основном от этого угла функционально зависят все режимно-энергетические, удельные массогабаритные, стоимостные, надежностные и другие технико-экономические показатели вентильных схем любого класса, в которых наблюдается

явление коммутации [17]. Как показано в [3,9,15], инженерный синтез таких схем затруднен ввиду математической незамкнутости известных трансцендентных уравнений для \mathcal{J} , полученных еще в 20-х годах [4], и существующей неопределенности зависящих от \mathcal{J} соотношений [4-8,10-12,16]. Последнее приводит к практически не поддающейся контролю произвольности массогабаритных и стоимостных показателей (МГСП) ВП, необходимости разработки их лишь на основе большого практического опыта и инженерной интуиции или путем весьма приближенных расчетов с последующим выполнением трудоемких экспериментальных доводов, привлечения высококвалифицированных специалистов, применения дорогостоящей сервисной аппаратуры и т.п., что не всегда возможно.

Приводимые ниже результаты доведены до уровня, не требующего от пользователя многолетнего опыта и высокой квалификации; все сведения, необходимые исследователю и проектировщику, даны в компактном табличном виде, в форме простых, информационно емких номограмм, рассчитанных на современных ЭВМ, и замкнутых рекуррентных соотношений, пригодных для непосредственного практического использования. При этом результаты охватывают все возможные симметричные m -лучевые и основные M -фазные мостовые схемы (рис.1) при их работе в любых, k -го порядка, коммутационных режимах (типа $P \in K_k$, $k = \overline{1, k_x}$ [1,3,9,17]), при произвольных значениях тока, напряжения, мощности нагрузки и амплитуды, частоты, мощности источников преобразуемых ЭДС, любых типах вентилей и пр., что обеспечивает достаточную общность и универсальность результатов. Приведены также данные по коммутационным режимам \bar{II} рода (типа $P \in K_{k\bar{II}}$ [3,17]), практически не освещенным в литературе.

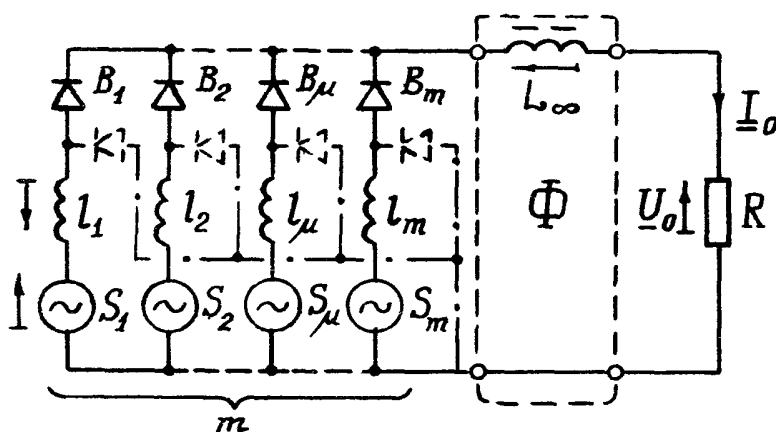


Рис.1

Работа схем в указанных режимах обусловлена электромагнитной энергией, накапливаемой в индуктивностях l_μ внутренних ветвей ВП ($\mu = \overline{1, m}$), учет которых для рассматриваемого класса схем наиболее существен. К схемам данного класса относятся относительно мощные или высоковольтные, или работающие при сравнительно повышенных частотах ВП, в которых индуктивности рассеяния преобладают над внутренними активными сопротивлениями, а также ВП, содержащие различные токоограничительные, энергодозирующие, разделительные, накопительные, уравнивательные и тому подобные внутренние индуктивности, дроссели, реакторы.

Для конкретности и упрощения приняты типичные условия:

- форма преобразуемых ЭДС S_μ с начальными фазами ψ_μ , амплитудами $S_{a\mu}$, частотами $\omega_\mu = 2\pi f_\mu$ - синусоидальная, что подчеркивается обозначением S [3,9,13,17];

- соблюдается при всех k полная симметрия внутренних ветвей (фаз трансформаторов, машин, вентилях и пр.) [1-17];

$$S_{a\mu} = S_a, l_\mu = l, f_\mu = f, x_\mu = \omega_\mu l_\mu = x, \psi_\mu = (\mu-1)2\theta, \forall \mu, k, \quad (I)$$

где $\mu = \overline{1, m}$ - текущий номер внутренней ветви;

$\theta = \pi/\Pi$ - половина периода огибающей выходного напряжения U_n при ХХ ВП;

$\Pi = f_n/f$ - кратность частоты f_n пульсации напряжения U_n , равная m - в лучевых или $2M$ - в мостовых схемах;

M - число токообразующих ЭДС или циклически сменяющихся во времени контуров прохождения тока нагрузки;

$k = \overline{1, k_x}$ - номер коммутационного режима [1,3,17];

- ток общей нагрузки неизменен за период $i_n \approx I_0$, где I_0 - среднее значение тока полезной нагрузки, это равносильно гипотетическому условию $L \rightarrow \infty$, широко используемому в зарубежной и отечественной литературе специалистами по ВП [3-17] и приемлемому в практических схемах уже при $L > (2-5)R/\omega$ [6,9,15];

- размерные значения токов, напряжений отмечаются чертой снизу, безразмерные - без черты; основание для напряжений - $U_a \approx S_a$ в лучевых или $S_{a\lambda}$ - в мостовых схемах, для токов - $I_a \approx S_a/x$, $S_{a\lambda}/x$; размерные значения получают из безразмерных умножением на их основания.

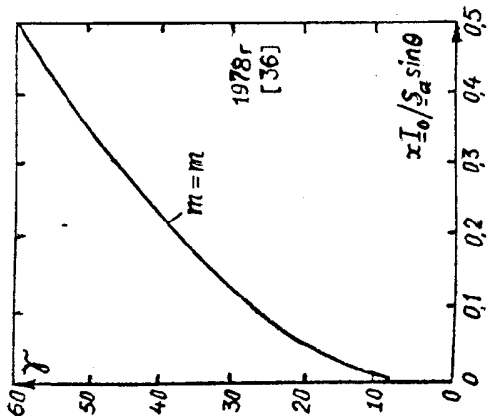
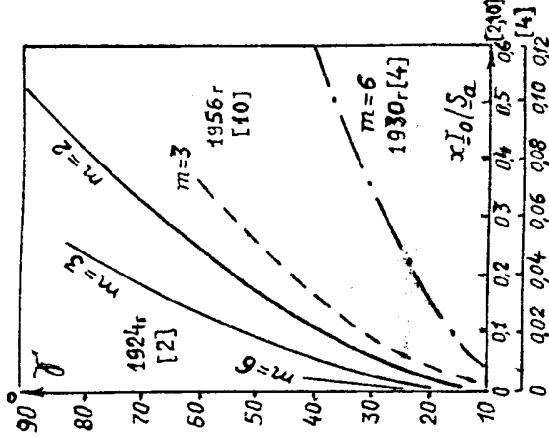
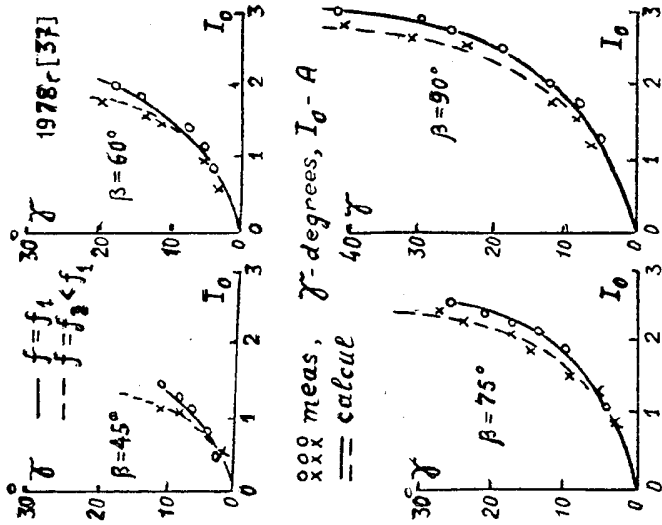


Рис.1

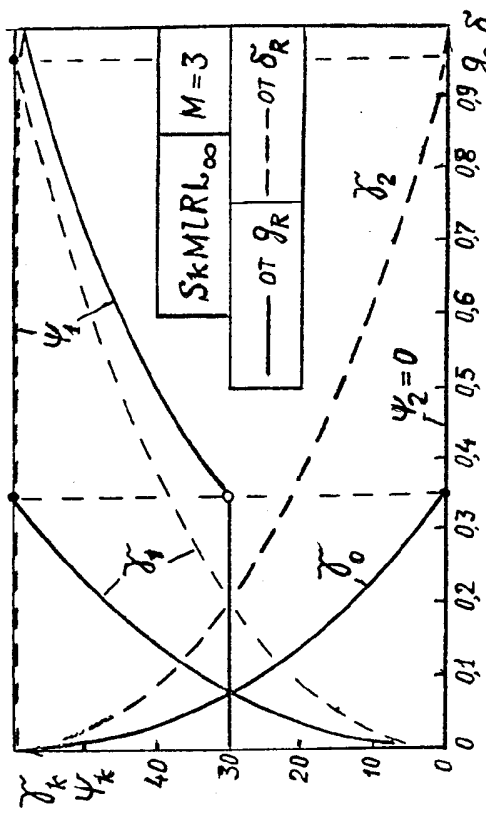
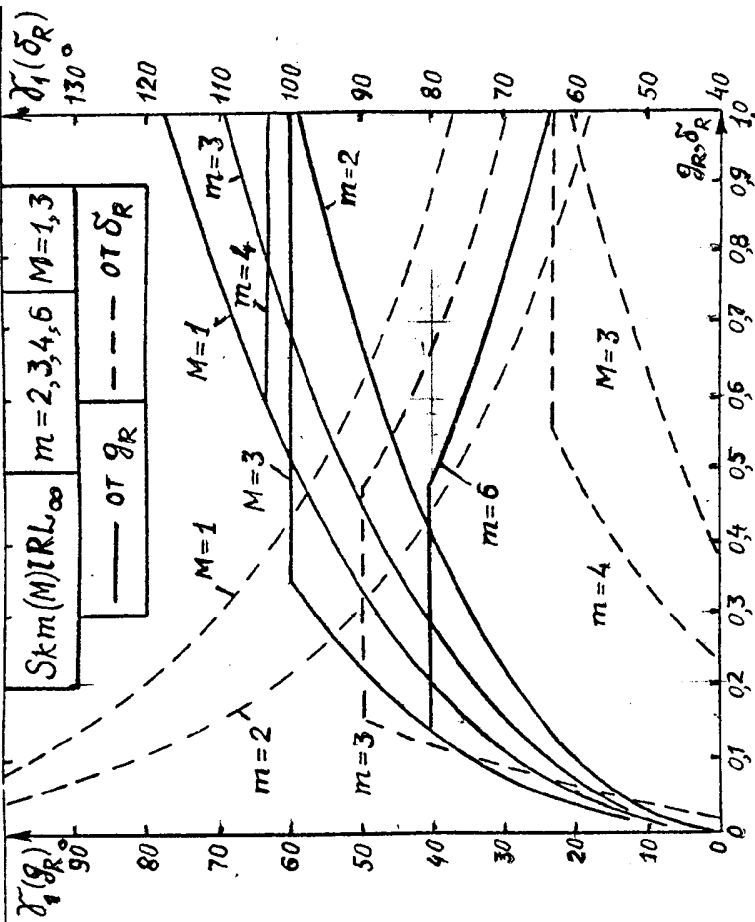
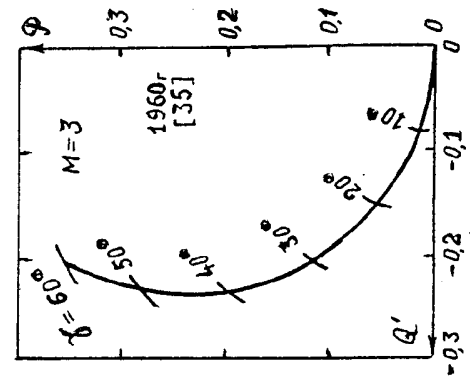


Рис.2



Таким образом, рассмотрению подлежит весьма широкий класс схемных структур ВП, для краткости и удобства изложения обозначенный в виде $Sk m(M)LR L_{\infty}$ [3,9,17]. При этом фильтр Φ , являющийся в общем случае многозвенным, представлен на рис.1 элементом L_{∞} , а полезная нагрузка, включенная за Φ , - сопротивлением R . К подобным эквивалентным структурам наряду с многочисленными схемами ВП приводится также ряд других технических средств, широко применяемых в различных отраслях, в частности, инверторы, асинхронные и другие электрические машины, снабженные выпрямителями, в том числе асинхронные вентильные каскады (АВК) электропривода, авиационные вентильные генераторы (АВГ), индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП), силовые симисторные формирователи сравнительно узких импульсов напряжения (ФИН) и др.[3-17].

Существующие для этих применений частные теории основаны на тех же предположениях, которые привели к известной неопределенности общей теории вентильных преобразователей энергии [4], и потому обладают теми же недостатками. От них свободны результаты новой теории, приведенные далее. В отличие от известных (рис.2), называемых незамкнутыми результатами, приводимые ниже будем именовать замкнутыми [9].

Замкнутые результаты и их достоинства

Полученные автором замкнутые расчетные формулы [3,9] для $\gamma = \gamma/2$ и U_0 даны в табл.1,2, а результаты численных решений на ЭВМ для наиболее распространенных в радиоэлектронике типов схем - в табл.3-5 и на рис.3-6. Для выявления их достоинств полезно сопоставление с уже известными результатами. Последним свойственно, например для m -лучевых схем в первом режиме ($k = 1$), следующее:

- угол γ зависит от п я т и величин: m, f, l, S_a, I_0 ,
- при решении задачи анализа, когда схемная структура ВП и ее элементы m, f, l, S_a известны, уравнение для γ содержит два неизвестных: γ, I_0 ;
- при синтезе ВП известны I_0, m, f (иногда l), неизвестны γ, S_a .

Таким образом, как при анализе, так и при инженерном синтезе схем данного класса традиционное уравнение для \mathcal{J} , как всякое уравнение с двумя неизвестными, дает бесчисленное множество решений. Именно этим обусловлена обычно необъясняемая в литературе неопределенность незамкнутых соотношений, как и разработанных на их основе расчетных номограмм.

Для мостовых и других типов схем, а также при работе в иных, более сложных, чем при $k = 1$, режимах - ситуация аналогична. Из-за многочисленности и сложности соответствующих уравнений, требующих значительных пояснений и объема, здесь они не анализируются.

Главные существенные отличия и полезность новых результатов:

- уравнения для \mathcal{J} и, значит, многие другие соотношения, связанные с этим углом, математически замкнуты, так как содержат только одно неизвестное (\mathcal{J}); этим устраняется по данному классу схем существовавшая с 20-х годов неопределенность традиционных соотношений и обусловленные ею недостатки;

- полезность решения относится и к задаче анализа, и обычно решаемой самостоятельно более сложной задаче инженерного синтеза схем;

- полученные результаты охватывают любые симметричные m -лучевые и основные M -фазные мостовые схемы, что исключает необходимость их отдельного исследования, как это производилось ранее;

- сведения табл. 1-5 и рис. 3-6 отличаются простотой и универсальностью; они даны как для первого ($k = 1$), так и для любого k -го коммутационного режима, изучаемых обычно самостоятельно, преимущественно при $k = 1$ (рис. 2);

- универсальность и простота результатов обеспечена их рекуррентностью по m и k и связью \mathcal{J}_k всего лишь с одним и тем же безразмерным параметром - обобщенной постоянной времени взаимных ветвей $g_R = x/R = 1/\delta_R$, инверсной обобщенному декременту их затухания;

- рекуррентность соотношений, в свою очередь, обеспечивает простоту и удобство построения и отладки алгоритмов и машинных программ, а также разработки многоцелевых (универсальных) номограмм;

- номограммы охватывают все режимы от ХХ до КЗ основных схем данного класса и полезны при изучении параметрической динамики физи-

ческих состояний ВП, практических расчетах, а также при выполнении сопоставлений с результатами других классов схем;

Т а б л и ц а 1

	$m=2$		$M=1$		$m=3$		$M=3$	
	$k=1$		$k=1$		$k=1$	$k=2$	$k=1$	$k=2$
g_R	$\pi \operatorname{tg}^2 \gamma$ $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$		$\frac{\pi}{2} \operatorname{tg}^2 \gamma$ $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$		$\frac{2\pi}{3} \operatorname{tg}^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 45^\circ$	$2\pi \operatorname{ctg}^2 \gamma_1$ $45^\circ \geq \gamma_1 \geq 0$	$\frac{\pi}{3} \operatorname{tg}^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 30^\circ$	$\frac{\pi}{9} \operatorname{ctg}^2 \gamma_1$ $30^\circ \geq \gamma_1 \geq 0$
	$m=4$			$m=6$				
	$k=1$	$k=2$		$k=3$		$k=3$		
g_R	$\frac{\pi}{2} \operatorname{tg}^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 31,7^\circ$	$\frac{3\pi}{2} \left[\frac{10}{(3 \cos \gamma_2 - \sin \gamma_2)^2} - 1 \right]$ $13,3^\circ \leq \gamma_2 \leq 35,8^\circ$		$3\pi \operatorname{tg}^2(45^\circ + \gamma_3)$ $9,2^\circ \leq \gamma_3 \leq 45^\circ$		$2\pi \left[\frac{0,396}{A(\gamma_3)B(\gamma_3)} - 1 \right]$ $8,75^\circ \leq \gamma_3 \leq 22,75^\circ$		
	$m=6$							
	$k=1$	$k=2$		$k=4$		$k=5$		
g_R	$\frac{\pi}{3} \operatorname{tg}^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 20,45^\circ$	$\pi \left[\frac{28}{(3\sqrt{3} \cos \gamma_2 - \sin \gamma_2)^2} - 1 \right]$ $9,55^\circ \leq \gamma_2 \leq 21,5^\circ$		$\frac{2\pi}{3} \left[\frac{1,55}{A(\gamma_4)B(\gamma_4)} - 1 \right]$ $7,2^\circ \leq \gamma_4 \leq 25,5^\circ$		$5\pi \operatorname{tg}^2(60^\circ + \gamma_5)$ $4,95^\circ \leq \gamma_5 \leq 30^\circ$		
	$A(\gamma_3) = \frac{\sqrt{3}}{4} \sin \gamma_3 + \frac{2}{3} \sin(\frac{\pi}{6} - \gamma_3);$ $B(\gamma_3) = \cos \gamma_3 - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin \gamma_3;$				$A(\gamma_4) = \frac{1}{5} \sin \gamma_4 + \frac{\sqrt{3}}{4} \sin(\frac{\pi}{6} - \gamma_4)$ $B(\gamma_4) = \cos(\frac{\pi}{6} + \gamma_4) - \frac{1}{5} \sin \gamma_4$			

- определение угла γ_k по таким номограммам и формулам не требует, в отличие от известных (рис.2), предварительного знания целого ряда конкретных размерных данных, поскольку в представленном виде γ_k не зависит от частных значений тока, напряжения, мощности ВП, амплитуды, частоты, мощности источников преобразуемых ЭДС, а также типа и сложности фильтров и постоянных изменений элементной базы;

- результаты унифицированы, что предопределяет их широкое использование для преобразователей энергии самых разнообразных объектов: ВП РЭА, генераторов низкотемпературной плазмы (плазмостронов), электрофизических установок возбуждения сильных магнитных полей, требующихся для фокусировки пучков заряженных частиц, вентильных каскадов асинхронных двигателей, синхронных генераторов, энергетических систем передачи постоянного тока, электрифицированного транспорта, электролиза, сварки, в том числе плазменной и т.д.

Таким образом, приведенные результаты пригодны во многих практически важных случаях и областях применения вентильных структур данно-

Зависимости напряжений $U_{0(k)}$ и $\bar{U}_{0(k)}$

	$m=2$		$M=1$		$m=3$		$M=3$
	$\kappa=1$	$\kappa=1$	$\kappa=1$	$\kappa=2$	$\kappa=1$	$\kappa=2$	$\kappa=1$
U_0	$\frac{2}{\pi} \cos^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 90^\circ$	$\frac{2}{\pi} \cos^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 90^\circ$	$\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cos^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 45^\circ$	$\frac{3}{2\pi} \sin^2 \gamma_1$ $45^\circ \geq \gamma_1 \geq 0$	$\frac{3}{\pi} \cos^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 30^\circ$		
	$\frac{2}{\pi + g_R}$ $0 \leq g_R \leq \infty$	$\frac{1}{\pi/2 + g_R}$ $0 \leq g_R \leq \infty$	$\frac{\sqrt{3}}{2\pi/3 + g_R}$ $0 \leq g_R \leq 2,09$	$\frac{3}{2\pi + g_R}$ $2\pi \leq g_R \leq \infty$	$1/(\frac{\pi}{3} + g_R)$ $0 \leq g_R \leq 0,35$		
	$(2 - I_0)/\pi$ $0 \leq I_0 \leq 2$	$2(1 - I_0)/\pi$ $0 \leq I_0 \leq 1$	$\frac{3}{\pi} (\frac{\sqrt{3}}{3} - \frac{I_0}{2})$ $0 \leq I_0 \leq \sqrt{3}/2$	$(3 - I_0)/2\pi$ $1,5 \leq I_0 \leq 3$	$\frac{3}{\pi} (1 - I_0)$ $0 \leq I_0 \leq 0,25$		
\bar{U}_0	$1 - \bar{I}_0$ $0 \leq \bar{I}_0 \leq 1$	$1 - \bar{I}_0$ $0 \leq \bar{I}_0 \leq 1$	$1 - \sqrt{3} \bar{I}_0$ $0 \leq \bar{I}_0 \leq 0,289$	$\sqrt{3} (1 - \bar{I}_0)/3$ $0,505 \leq \bar{I}_0 \leq 1$	$1 - \frac{\sqrt{3}}{3} \bar{I}_0$ $\frac{1}{4} \leq \bar{I}_0 \leq \frac{\sqrt{3}}{4}$		

	$m=4$			$M=3$	
	$\kappa=1$	$\kappa=2$	$\kappa=3$	$\kappa_2=1$	$\kappa=2$
U_0	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 31,7^\circ$	$\frac{6}{\pi\sqrt{10}} (\cos \gamma_2 - \frac{1}{3} \sin \gamma_2)^2$ $13,3^\circ \leq \gamma_2 \leq 35,8^\circ$	$\frac{4}{3\pi} \sin^2 (\frac{\pi}{4} - \gamma_3)$ $9,2^\circ \leq \gamma_3 \leq 45^\circ$	$\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cos \psi_1$ $\pi/6 \leq \psi_1 \leq \pi/3$	$\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sin^2 \gamma_1$ $30^\circ \geq \gamma_1 \geq 0$
	$\frac{\sqrt{2}}{\pi/2 + g_R}$ $0 \leq g_R \leq 0,6$	$\sqrt{10}/(\frac{3\pi}{2} + g_R)$ $1,793 \leq g_R \leq 9,08$	$4/(3\pi + g_R)$ $18,3 \leq g_R \leq \infty$	$1/2 \sqrt{\frac{\pi^2}{27} + g_R^2}$ $\pi/9 \leq g_R \leq \pi/3$	$\frac{\sqrt{3}}{3}/(\frac{\pi}{9} + g_R)$ $\pi/3 \leq g_R \leq \infty$
	$\frac{2}{\pi} (\sqrt{2} - I_0)$ $0 \leq I_0 \leq 0,652$	$\frac{2}{3\pi} (\sqrt{10} - I_0)$ $0,814 \leq I_0 \leq 2,065$	$(4 - I_0)/3\pi$ $2,635 \leq I_0 \leq 4$	$\frac{3}{\pi} \sqrt{3(\frac{1}{4} - I_0^2)}$ $1/4 \leq I_0 \leq \sqrt{3}/4$	$\frac{9}{\pi} (\frac{\sqrt{3}}{3} - I_0)$ $\sqrt{3}/4 \leq I_0 \leq \sqrt{3}/3$
\bar{U}_0	$1 - 2\sqrt{2} \bar{I}_0$ $0 \leq \bar{I}_0 \leq 0,724$	$\frac{\sqrt{2}}{6} (\sqrt{10} - 4\bar{I}_0)$ $0,219 \leq \bar{I}_0 \leq 0,514$	$\frac{\sqrt{2}}{3} (1 - \bar{I}_0)$ $0,657 \leq \bar{I}_0 \leq 1$	$\frac{1}{2} \sqrt{3 - 4\bar{I}_0^2}$ $\sqrt{3}/4 \leq \bar{I}_0 \leq 3/4$	$\sqrt{3} (1 - \bar{I}_0)$ $3/4 \leq \bar{I}_0 \leq 1$

	$m=6$				
	$\kappa=1$	$\kappa=2$	$\kappa=3$	$\kappa=4$	$\kappa=5$
U_0	$\frac{3}{\pi} \cos^2 \gamma_1$ $0 \leq \gamma_1 \leq 20,5^\circ$	$\frac{\sqrt{3}}{4\pi\sqrt{7}} (9\cos \gamma_2 - \sqrt{3}\sin \gamma_2)^2$ $9,5^\circ \leq \gamma_2 \leq 21,3^\circ$	$\frac{24}{\pi\sqrt{19}} A(\gamma_3)B(\gamma_3)$ $8,7^\circ \leq \gamma_3 \leq 22,7^\circ$	$\frac{30}{\pi\sqrt{31}} A(\gamma_4)B(\gamma_4)$ $7,2^\circ \leq \gamma_4 \leq 25,5^\circ$	$\frac{6}{5\pi} \sin^2 (\frac{\pi}{6} - \gamma_5)$ $4,5^\circ \leq \gamma_5 \leq 30^\circ$
	$1/(\frac{\pi}{3} + g_R)$ $0 \leq g_R \leq 0,1456$	$\sqrt{7}/(\pi + g_R)$ $0,432 \leq g_R \leq 1,24$	$\sqrt{19}/(2\pi + g_R)$ $2,47 \leq g_R \leq 6,72$	$\sqrt{31}/(\frac{10}{3}\pi + g_R)$ $11,35 \leq g_R \leq 30,1$	$6/(5\pi + g_R)$ $68,8 \leq g_R \leq \infty$
	$\frac{3}{\pi} (1 - I_0)$ $0 \leq I_0 \leq 0,122$	$(\sqrt{7} - I_0)/\pi$ $0,321 \leq I_0 \leq 0,749$	$(\sqrt{19} - I_0)/2\pi$ $1,226 \leq I_0 \leq 2,25$	$3(\sqrt{31} - I_0)/10\pi$ $2,85 \leq I_0 \leq 4,13$	$(6 - I_0)/5\pi$ $4,88 \leq I_0 \leq 6$
\bar{U}_0	$1 - 6\bar{I}_0$ $0 \leq \bar{I}_0 \leq 0,02$	$\frac{\sqrt{7}}{3} - 2\bar{I}_0$ $0,0535 \leq \bar{I}_0 \leq 0,125$	$\frac{\sqrt{19}}{6} - \bar{I}_0$ $0,2 \leq \bar{I}_0 \leq 0,375$	$0,1(\sqrt{31} - \bar{I}_0)$ $0,481 \leq \bar{I}_0 \leq 0,69$	$0,4(1 - \bar{I}_0)$ $0,813 \leq \bar{I}_0 \leq 1$

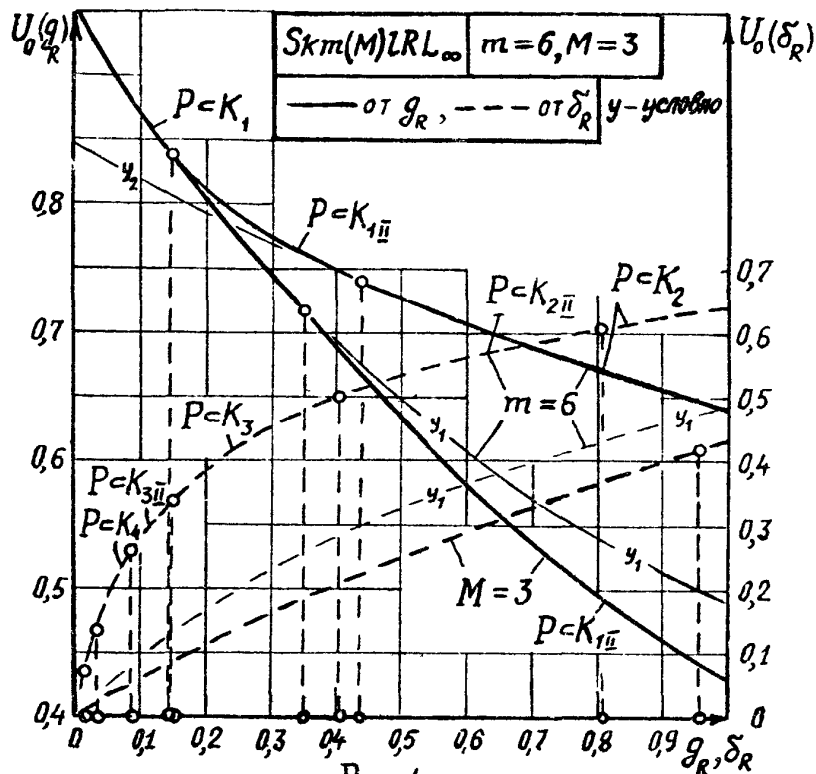
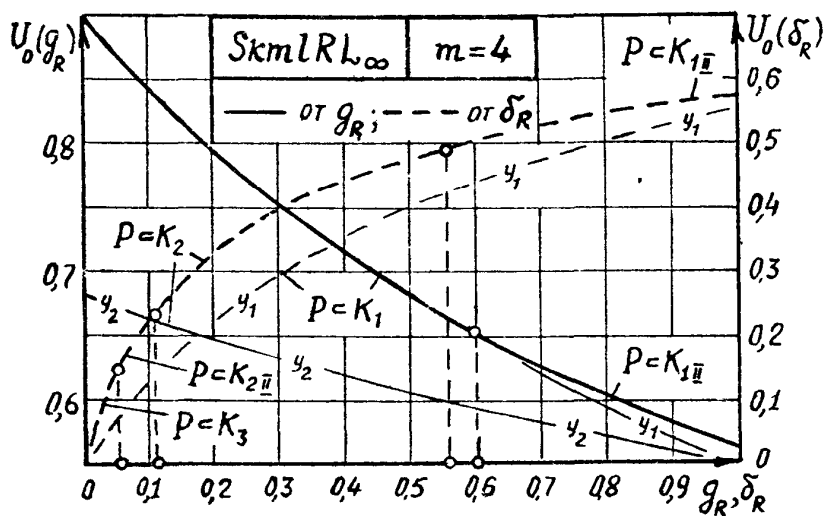
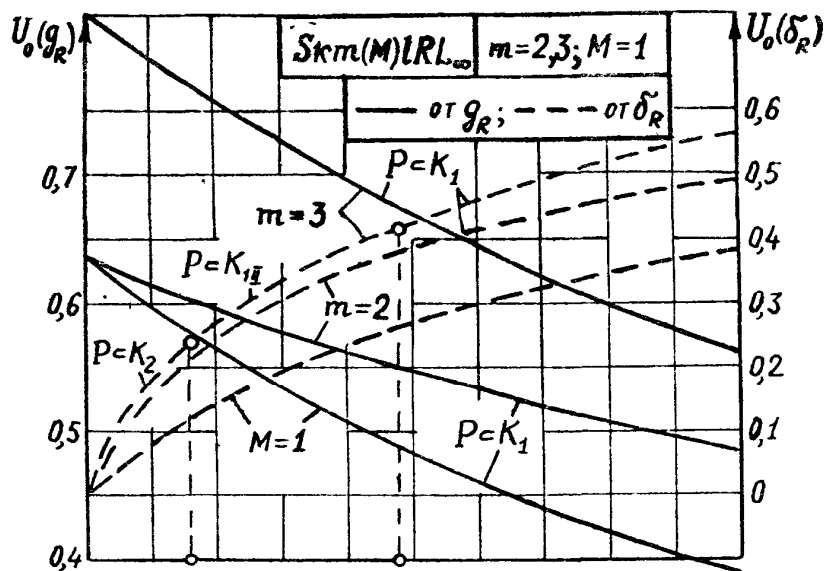


Рис. 4

Таблица 3

k	M=1 m=2	m=3		M=3		m=4			m=6				
	1	1	2	1	2	1	2	3	1	2	3	4	5
Ψ_k	0	30	0	30	0	45	18,4	0	60	40,9	23,4	8,9	0
$\bar{\delta}_{k\text{кр}}(k)$	180	90	120	60	60	63,4	71,6	90	40,9	42,5	45,5	51	60
$\bar{\delta}'_{k\text{кр}}(k)$	0	30	0	60	0	26,6	18,4	0	19,1	17,5	14,5	8,9	0
$\bar{g}_{R\text{кр}}(k)$	∞	2,09	∞	0,35	∞	0,6	9,08	∞	0,146	1,24	6,72	30,1	∞
$\bar{\delta}_{R\text{кр}}(k)$	0	0,477	0	2,86	0	1,67	0,11	0	6,867	0,807	0,149	0,033	0
$\bar{U}_{0\text{кр}}(k)$	0	0,413	0	0,717	0	0,652	0,229	0	0,838	0,604	0,335	0,137	0
$\bar{I}_{0\text{кр}}(k)$	1(2)	0,866	3	0,25	0,577	0,392	2,065	4	0,122	0,749	2,25	4,13	6
$\bar{U}'_{0\text{кр}}(k)$	0	0,5	0	0,75	0	0,724	0,255	0	0,877	0,632	0,35	0,144	0
$\bar{I}'_{0\text{кр}}(k)$	1	0,288	1	0,433	1	0,098	0,514	1	0,02	0,125	0,375	0,69	1

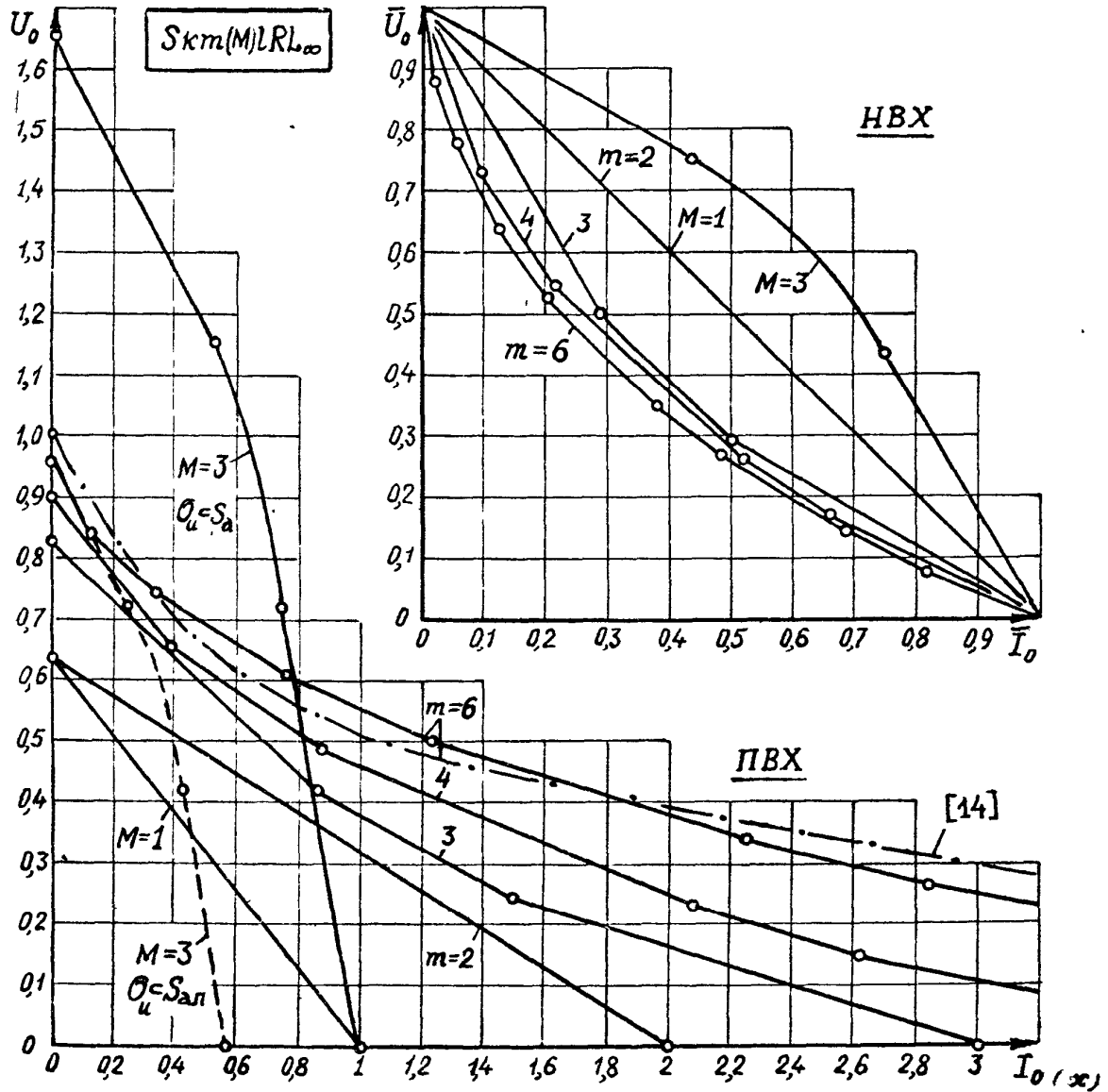


Рис. 5

го класса, где исследование электромагнитных процессов и разработку методов инженерного синтеза схем на основе незамкнутых алгоритмов осуществляют обычно самостоятельно. Последнее приводит к многочисленности подобных разработок, их дублированию, а также к методологической и терминологической разобщенности из-за принадлежности к разным отраслям и странам при одновременно больших затратах средств и людских ресурсов.

В общем случае замкнутое уравнение для γ_k имеет вид [3,9]

$$\| A(\gamma_k) B(\gamma_k) = \frac{k^2 \theta A'_k}{k^+(k k^+ \theta + g_R)}; \quad \gamma_k = F(m, k, g_R); \quad (2)$$

$$\gamma_{k^-} = 2\theta - \gamma_k,$$

где $A_k = \sqrt{A'_k}$; $A'_k = 1 - 2a_k \cos k^+ \theta + a_k^2 = F(m, k)$; $k^\pm = k \pm 1$, (3)

$$a_k = \text{mod} \frac{1}{k} \sum_{\mu=1}^k S_\mu(\vartheta) \Big|_{\vartheta = \omega t \in [\gamma_k, 2\theta]} = \sin k \theta / k \sin \theta; \quad (4)$$

$$a_{k^+} = \text{mod} \frac{1}{k^+} \sum_{\mu=1}^{k^+} S_\mu(\vartheta) \Big|_{\vartheta \in [0, \gamma_k]} = \sin k^+ \theta / k^+ \sin \theta$$

свободны от угла γ_k и начального момента ψ_k открытия вентиля, а функции

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

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

выражены только через γ_k при данных k, m и как (3), (4) также не зависят от ψ_k при любых $k = \overline{1, k_x} < m$, $m = \overline{2, \infty}$. Так как $k = F(g_R)$, то $\gamma_k = F(m, g_R)$ (рис.3), а не $F(S_a, \overline{I_0, \dots})$ (рис.2). В свою очередь, угол ψ_k находится тоже просто [9]

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

поскольку его расчет не связан с предварительным определением угла коммутации и не зависит от конкретных значений мощности, напряжения, тока нагрузки, частоты и амплитуды преобразуемых ЭДС и пр. (табл.3).

Выражение для среднего значения выходного напряжения [3]

$$U_{0(k)} = \frac{1}{2\theta} \left[\int_0^{\gamma_k} u_{0(k)} + \int_{\gamma_k}^{2\theta} u_{0(k^-)} \right] d\psi = \quad \parallel \quad (8)$$

$$= k^+ A(\gamma_k) B(\gamma_k) / k \theta A_k = F(m, k, \gamma_k),$$

дающее для первого режима ($k = 1$) общеизвестное соотношение [4-9] $U_{0(1)} = \sin \theta (1 + \cos \gamma)$, благодаря замкнутости (2) приобретает чрезвычайно простой вид

$$U_{0(k)} = \frac{k A_k}{k k^+ \theta + g_R} = F(m, g_R). \quad \parallel \quad (9)$$

В отличие от традиционных результатов соотношение (9) и подобные ему [1,3,9] не связаны с предварительным и трудоемким определением углов γ_k, ψ_k , не страдают неопределенностью, не требуют разработки и отладки машинных алгоритмов и программ и обращения к ЭВМ для численных решений не разрешимых аналитически трансцендентных уравнений, удобны для практики, охватывая любые схемы и их режимы благодаря рекуррентности по m и k , просты, наглядны, зависят всего лишь от одного реального параметра g_R (табл.2, рис.4) и тем намного экономят дефицит объема, времени и средств. Кроме того, зная $U_{0(k)}$, можно легко найти такой важный при анализе параметр, как ток нагрузки $I_{0(k)}$, а также обычно трудно определяемую при синтезе схем амплитуду ЭДС S_a (или $S_{aл}$):

$$I_{0(k)} = g_R U_{0(k)}; \quad S_a = \underline{U}_0 / U_0. \quad \parallel \quad (10)$$

Из (9), (10) также просто и при том в явном виде (в отличие от дуального класса $Sk m LR // C_\infty$ [13]) получаем зависимости приведенных к основаниям (ПВХ, $U_{0(k)} = F(I_{0(k)})$) и нормированных (НВХ, $\bar{U}_{0(k)} = \underline{U}_{0(k)} / \underline{U}_{0 \times \times} = F(\bar{I}_{0(k)} = I_{0(k)} / I_{0 \times \times})$) внешних характеристик (ВХ) (рис.5, табл.2-5):

$$U_{0(k)} = \frac{k A_k - I_{0(k)}}{k k^+ \theta}; \quad \bar{U}_{0(k)} = \frac{k A_k - m \bar{I}_{0(k)}}{k k^+ \sin \theta}. \quad \parallel \quad (11)$$

Для обычно изучаемого в литературе первого режима ($k = I$; [6-8, 10-12, 16]), наиболее присущего схемам с малым числом преобразуемых ЭДС, а также последнего режима ($k = k_x = m^- = m - 1$), включающего режим глухого КЗ и отражающего, в зависимости от конкретного при-

Таблица 4

m	3			4			6				
k	1	1	2	1	2	3	1	2	3	4	5
$U_{охх(k)yc}$	0,637	0,827	0,477	0,902	0,672	0,424	0,955	0,843	0,694	0,532	0,382
$I_{окз(k)yc}$	2	1,732	3	1,414	3,162	4	1	2,646	4,359	5,568	6
$\bar{U}_{охх(k)yc}$	1	1	0,577	1	0,746	0,471	1	0,882	0,727	0,557	0,4
$\bar{I}_{окз(k)yc}$	1	0,577	1	0,354	0,791	1	0,167	0,441	0,727	0,928	1

менения и условий работы ВП, нормальные, аномальные, предаварийные или аварийные состояния, (3)-(11) дают:

$$g_{R(1)} = 2\theta \operatorname{tg}^2 \gamma_1; \quad g_{R(k_x)} = m^- \pi \operatorname{ctg}^2(\theta - \gamma_{k_x}); \quad (12)$$

$$U_{0(1)} = \frac{\sin \theta}{\theta} \cos^2 \gamma_1 = \frac{2 \sin \theta}{2\theta + g_R} = \frac{2 \sin \theta - I_0}{2\theta}; \quad \bar{U}_{0(1)} = 1 - \frac{m \bar{I}_0}{2 \sin \theta}; \quad (13)$$

$$U_{0(k_x)} = \frac{m \sin^2(\theta - \gamma_{k_x})}{m^- \pi} = \frac{m}{m^- \pi - g_R} = \frac{m - I_0}{m^- \pi}; \quad \bar{U}_{0(k_x)} = \frac{1 - \bar{I}_0}{m^- \sin \theta}. \quad (14)$$

При этом ВХ по всем нечетным отрезкам при любых m и по любым отрезкам при $M = 1, 3$ совпадают с известными в литературе (см. [4-8] и др.*), что свидетельствует о правильности полученных выше результатов. Четные отрезки ВХ лучевых ВП относятся к режимам \bar{II} рода, не нашедшим в литературе должного освещения.

Критические параметры схем и режимы \bar{II} рода

Знание критических параметров схем, соответствующих переходу из одного режима в другой, очень важно для практики и теории вентильного преобразования энергии [17]. При этом аналитические, табличные или номографические способы оценки типа режимов, в которых работают реаль-

*) Кроме ошибочной [14].

ные или могут оказаться проектируемые ВП, намного выгоднее экспериментальных в силу большей простоты, удобства, оперативности, экономичности.

Уравнения связи критических параметров схем класса $Sk m(M)LR L_{\infty}$, принципы их получения и расчетов на ЭВМ, а также алгоритмы по оперативной оценке типа режимов аналогичны изложенным в [17]. Здесь они опускаются из-за ограничения объема. Конкретные значения таких параметров, соответствующие окончанию k -го режима, даны по расчетам на ЭВМ для ряда конкретных схем в табл.3.

Между k -ми состояниями схем (режимами I рода) наблюдаются режимы \bar{II} рода (типа $P < K_{k\bar{II}}$; $k_{\bar{II}} = \overline{1, k_x^-}$; $k_x^- = k_x - 1 = m - 2$, [3, 17]). Критические параметры, соответствующие окончанию режимов $P < K_{k\bar{II}}$ и началу $P < K_{k^+}$, даны в табл.5. Для наиболее распространенных на практике первых режимов можно воспользоваться следующими весьма простыми соотношениями, не зависящими от $\gamma_1, \gamma_{1\bar{II}}$,

$$g_{R_{kp(1)}} = 2\theta \frac{1 + C_{kp(1)}}{1 - C_{kp(1)}} ;$$

$$g_{R_{kp(1\bar{II})}} = 3 g_{R_{kp(1)}} ,$$

где

$$C_{kp(1)} = \frac{1 - 4 \cos^2 \theta}{\sqrt{1 + 8 \cos^2 \theta}}, \quad \theta = \pi/m; \quad m = \overline{2, m_x}; \quad m_x \geq 2.$$

Т а б л и ц а 5

$k_{\bar{II}}$	$m=3$		$m=4$		$m=6$			
	1	1	1	2	1	2	3	4
$g_{R_{kp}(k\bar{II})}$	6,28	1,047	1,793	18,13	0,432	2,47	11,35	68,8
$\delta_{R_{kp}(k\bar{II})}$	0,159	0,955	0,558	0,0555	2,32	0,405	0,088	0,0145
$U_{0kp}(k\bar{II})$	0,239	0,414	0,486	0,145	0,741	0,496	0,255	0,071
$I_{0kp}(k\bar{II})$	1,5	0,433	0,875	2,635	0,321	1,226	2,85	4,88
$\bar{U}_{0kp}(k\bar{II})$	0,289	0,433	0,54	0,162	0,777	0,521	0,267	0,743
$\bar{I}_{0kp}(k\bar{II})$	0,505	0,75	0,219	0,657	0,0535	0,204	0,481	0,813

Эффективность замкнутых результатов

Требующиеся для синтеза III величины - режимно-энергетические, спектральные, полевые (по электромагнитной совместимости) и др., в связи с их зависимостью от угла коммутации для облегчения труда проектировщика строят обычно в функции от γ_1 ([4-8, 10-12, 16] и др.). Однако несомненно полезные преимущества графических и аналитических способов перед экспериментальными применительно к схемам класса $Skm(M)LR L_\infty$ и им подобным являлись до сих пор лишь потенциальными, поскольку, как отмечалось, сводились практически на нет существовавшей многозначностью решений уравнений для γ_k . Теперь эти полезные преимущества, благодаря замкнутости уравнений (2), данным табл. 1-5, номограммам рис. 3-6 и аналогичным им, могут быть реализованы.

Более того, замкнутость соотношений для углов γ_k и ψ_k позволяет вообще исключить их как промежуточные параметры из расчетных процедур проектировщика и разработать принципиально новые и эффективные способы синтеза III, основанные на использовании простых расчетных номограмм [1, 3, 15]. Для рассматриваемого класса схем они могут быть представлены непосредственно в зависимости лишь от одного схемного параметра g_R (рис. 6).

И как пример на рис. 6 для широко распространенных на практике однофазных мостовых схем Греча-Поллака [15] даны рассчитанные на ЭВМ параметрические номограммы ряда величин: действующего значения фазного напряжения $\underline{U}_\phi = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_\phi^2(\vartheta) d\vartheta}$, амплитуды обратного напряжения на вентилях $U_{a\delta} = \bar{1}$, определяющей их вентилярную прочность, среднего тока нагрузки \underline{I}_0 по (10), действующего значения фазного тока $\underline{I}_\phi = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi i_\phi^2(\vartheta) d\vartheta}$, а также расчетных коэффициентов $B = \underline{U}_\phi / \underline{U}_0$, $F = \underline{i}_{ав} / \underline{I}_0 = 1$, $\kappa_2 = \underline{I}_\phi / \underline{I}_0$, $O = U_{a\delta} / \underline{U}_0$. знание которых позволяет просто определить искомые при синтезе величины по заданным \underline{I}_0 , \underline{U}_0 [1, 3, 6, 15]. Этим в рамках единой теории обусловлены эффективность и практическая полезность замкнутых методов.

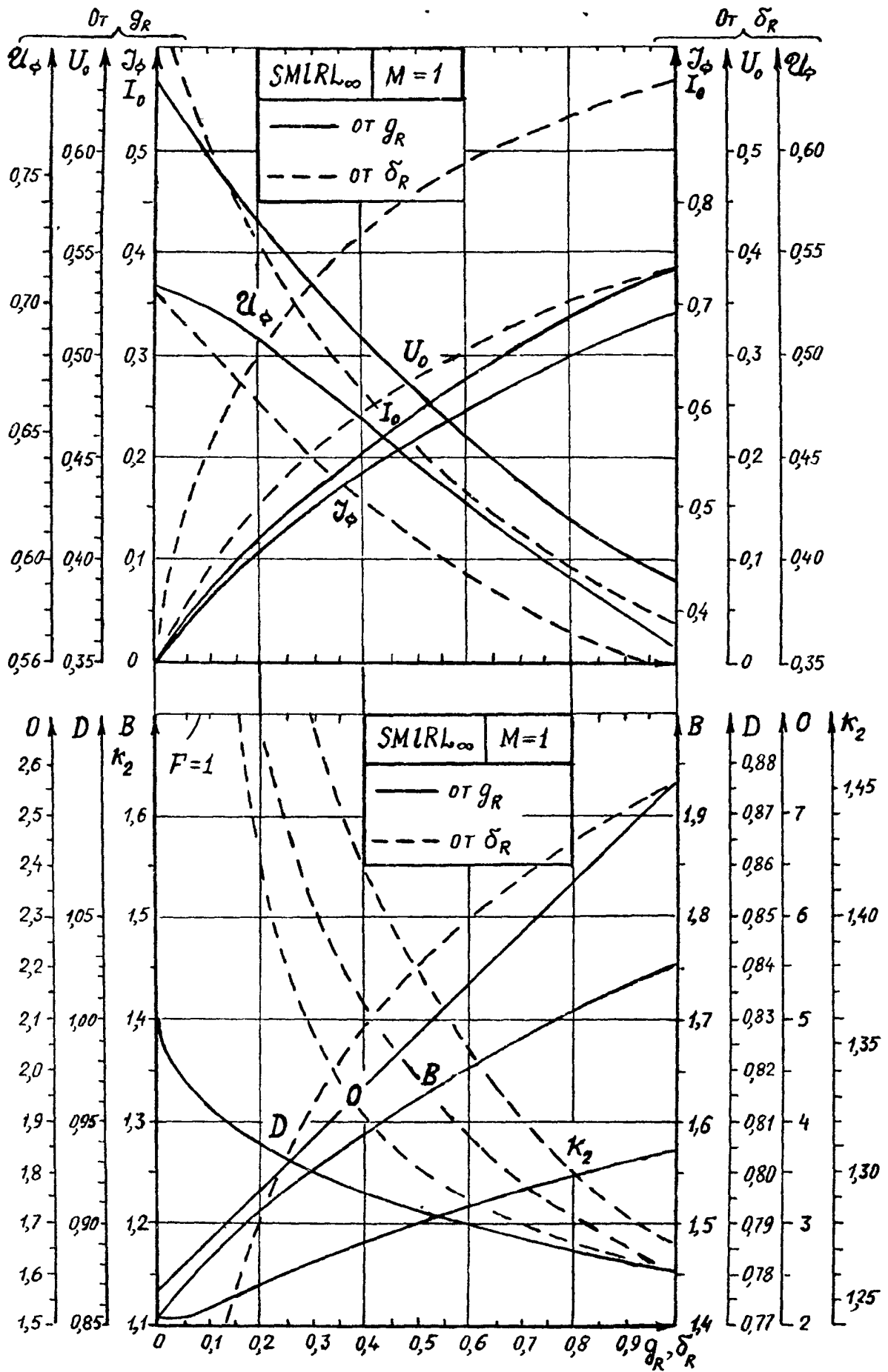


Рис. 6

ЛИТЕРАТУРА

1. Б е л о п о л ь с к и й И.И. и др. Стабилизаторы низких и милливольтовых напряжений. - М.: Энергия, 1974.
2. К о н е в Ю.И. Основные проблемы миниатюризации силовых электронных устройств и систем. - Электронная техника в автоматике. М.: Сов.радио, 1975, вып.7.
3. Р е п и н А.М. Эффективный метод замкнутого синтеза вентильных устройств с индуктивными фильтрами.: Информ.листок № 79-1092/ВИМИ. - М., 1978.
4. Dällenbach W., Gerecke E. Die Strom und Spannungsverhältnisse der Grossgleichrichter. - Arch. Elektrotechn., 1924, No 2.
5. Smith D.R. Characteristics of rectifiers from no load to short circuit. - Engineer, 1955, N 5211.
6. Т е р е н т ь е в Б.П. Электропитание радиоустройств. - М.: Связь, 1948.
7. К а г а н о в И.Л. Электронные и ионные преобразователи. - М.: ГЭИ, 1966.
8. Т о л с т о в Ю.Г. и др. Трехфазные силовые полупроводниковые выпрямители. - М.: Изд-во АН СССР, 1963.
9. Р е п и н А.М. О замкнутой форме инженерных методов проектирования выпрямителей РЭА. - Теоретическая электротехника, Изд-во ЛГУ, Львов, 1977, № 23.
10. Ш е в ч у к С.Н., К и р и е н к о В.П. Преобразователь с симметричными триодными тиристорами. - Электротехника, 1980, № 3.
11. Г л и н т е р н и к С.Р. Диаграммы для определения угла коммутации трехфазного мостового преобразователя. - Электричество, 1960, № 7.
12. Williamson A.C., Makky A.R. - Proc IEE, 1978, v. 125, N 2.
13. Р е п и н А.М. Параметрические состояния многовентильных схем класса $\xi k m l R // C_{\infty}$. - Электротехника и энергетика, 1978, № 6(I).
14. П а н ф и л о в В.Н., П а н ф и л о в Н.А. Анализ режимов шестифазной одноконтурной схемы применительно к вентильным сварочным генераторам с жесткими внешними характеристиками. - Тр. ВЗПИ, М., Изд-во ВЗПИ, 1979. № 109.

15. Репин А.М. Инженерный метод расчета мостового преобразователя малой мощности. – Полупроводниковая электроника в технике связи. – М.: Связь, 1980, вып.20.

16. Фильтры сглаживающие Г-образные для выпрямителей радиоустройств. Метод расчета параметров. ГОСТ 21703-76.

17. Репин А.М. Критические состояния вентиляльных преобразователей. – Изв.АН СССР, Энергетика и транспорт, 1980, № 4.

Статья поступила в апреле 1978г.

61

«О времени том, о людях с добром»¹

Первый из числа лиц, указанных в посвящении данной статьи и материала, опубликованного 12.6.12 в НЭА. URL: <http://econf.rae.ru/article/6859>, – Белопольский Исай Ильич. Мой старший товарищ. По его выражению – друг. По профессиональной области знаний – коллега. Редкий по порядочности человек. Ему можно было без опасения доверять всё. Человека создают родители, окружение, условия жизни. На долю Исаия Ильича, его родителей досталось много испытаний. Трудностей. Горестей. Горя.



В короткий промежуток времени наших профессиональных отношений (начало 1968–март 1972) Исай Ильич – начальник созданного и бессменно, до последней минуты жизни, руководимого им, комплексного отдела (КО-25, сегодня – НИО-25) по источникам электропитания радиолокационной аппаратуры (наземных РЛС), зам. главного конструктора предприятия п/я ... С 24 марта 1966 г. – научно-исследовательского радиотехнического института (НИРТИ). В 1970 году НИРТИ с опытным заводом – в составе ЦНПО «Вымпел». Исай Ильич – Председатель объединённого НТС по комплексной проблеме источников электропитания предприятий ЦНПО. С 25.11.1975 г. – НИИДАР /дальней радиосвязи. С 21 июня 1994 г. – научно-производственный комплекс (НПК). Ныне – ОАО НПК НИИДАР.

Исай Ильич – сын профессионального революционера. Родился 13 сентября 1913 года. В Енисейской губернии (сегодня Красноярский край). Где в это время находились его мама Белопольская (Винник) Мария Давыдовна и его 29-летний отец. Одессит Илья Исаевич (1884–25/12.10.1918). Революционер, большевик с 1903 г. Многократно судим (впервые арестован 11.7.1904 г.). Отбывал наказания в различных местах заключения, крепостях, тюрьмах. Европейской и Сибирской частях России (в т.ч., в частности, вместе с Н.К. Крупской). После очередного ареста в ночь на 9.1.1910 г. по решению Одесской судебной палаты 11–13.3.1911 г. (процесс 22-х) приговорён к ссылке на поселение. Отбывал её в с. Рыбинском. Канского уезда. Енисейск. губ. После манифеста 1913 г. получил возможность переехать в Красноярск.



С первых дней революции деятельно участвует в создании первых в послереволюционной Сибири организаций большевиков (местной и центральной, Сибирск. районного бюро ЦК). Первого большевистского печатного органа ("Сибирской Правды"). Участвует в организации проф. союзов в Красноярске. Руководит в качестве председателя Центрального бюро союзов. Как один из организаторов Красноярской Красной гвардии, он – в составе её штаба. После завоевания власти Советами работает на посту председателя отдела транспорта Совнархоза. Член губисполкома. На втором общесибирском съезде Советов в февр. 1918 г. избран в состав ЦИК Советов Сибири.

Но гражданская война внесла изменения. После эвакуации Красноярска Илья Исаевич 18 июня 1918 г. арестован в Туруханске белыми. В октябре привезён в Красноярскую тюрьму. И 25 (12) 10.1918 г. РАСТРЕЛЯН. Вместе с Г. Вейнбаумом, Я. Дубровинским, В. Яковлевым и А. Парадовским. По приговору чехословацкого военно-полевого суда.

Как спаслись Мария Давыдовна и Исай Ильич, как они жили (он жил) до 1945 года мне не известно. Возможно, сведения есть в его личном деле. Но известно, что проработав с 1945 г. на предприятии почти 30 лет, он скоропостижно скончался 31 марта 1972 г. На 59 году жизни. На рабочем месте. Безвинно убит на посту. Как отец. Как на страже и во благо жизни людей. Во благо Родины. Страны. России.

13 сентября быстро уходящего 2012 года Исаю Ильичу – 99. На сайте НПК НИИДАР этот факт зафиксирован. Светлая память о достойных людях сохранена.

Как всякие нормальные люди, генеральный директор Сергей Иванович Шляев, зам. ген. директора по персоналу Геннадий Николаевич Ключников, начальник отдела кадров Надежда Александровна Ильина, пресс-секретарь Сергей Алексеевич Симонов, несмотря на некруглость даты, отнеслись к моей просьбе естественно. С пониманием. По-человечески. За добро – Спасибо. От Исаия Ильича. И Ильи Исаевича с Марией Давыдовной.

Коллега и друг Исай Ильич старше меня на 22 года. И 13 дней. 26.9.2012 г. мне – 77.

В день двух семёрок фиксирую на электронном носителе электронного архива РАЕ пожелание 99-летнему Исаю Ильичу царствия небесного. Тем паче, что любое обычное число (в десятичной системе исчисления), содержащее девятки (и/или числа, в сумме образующие девятки либо кратные девяти числа) есть (согласно сформулированному мною закону девятки) нумерологическая (Пифагорова) 9_{нл}. Символ Мироздания.

¹ Использованы сведения из Internet