

Arkadiy M. Repin. The parametric conditions of the polyvalve electrical circuits

**А. М. Репин. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ МНОГОВЕНТИЛЬНЫХ СХЕМ
КЛАССА $\mathcal{E}km\ell R//C_\infty$.**

Реферат. Впервые для широкого познания, в т. ч. в электронной версии, и на основе интерметодического способа автора даны результаты исследования всех параметрических состояний k -го порядка ($\forall k \in [0, k_x]$) m -фазных вентильных конвертеров электроэнергии с ёмкостным $R//C$ -фильтром, внутренними индуктивностями ℓ_μ и фазными ЭДС произвольной \mathcal{E}_μ и синусоидальной S_μ форм ($\forall \mu \in [1, m]$). Или, кратко в обозначениях, схем класса $\mathcal{E}(S)km\ell R//C_\infty$. При толерансных (от 0 до ∞) значениях определяющего параметра $g = \omega \ell / R$. Тем самым, выражения для токов и режимных показателей схем при изучении электромагнитных процессов получены в рекуррентной форме для всего диапазона нагрузок. От холостого хода (ХХ) до короткого замыкания (КЗ). Показано, что схемы с ёмкостным накопителем энергии работают не только в обычно изучаемом режиме прерывистого выходного тока, но также в коммутационных режимах (с перекрытием или одновременной коммутацией внутренних ветвей). Установлено, что длительность заряда конденсатора (ёмкости C), перезаряжающегося $2k + 1$ раз за время λ_k -проводимости вентиля, всегда меньше λ_k , что открывает новые возможности по трактовке физических явлений в вентильных схемах с накопителями. Выявлены критические режимы схем и дана блок-программа решений на ЭЦВМ. Представленные в компактном виде и на единой физико-математической и методической основе сведения существенно расширяют тоже актуальные и полезные авторские результаты исследований схем класса $SmlR//C_\infty$, опубликованные в журнале Изв. ВУЗов, Энергетика, 1977, № 12, с. 46–53.

Далее приведены фрагменты исходного (машинописного) варианта статьи, представленного в редакцию указанного журнала, компьютерно набранная автором начальная её часть (полный вариант уничтожили злобы) и скан-копии депонированного варианта. В приложении частично проиллюстрированы рукописные авторские выкладки.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

Редколлегия журнала “Известия высших учебных заведений”

раздел “Энергетика”

30.9
18.20
запись 25.7.83
Т. Р. → 25.7.83

УДК 621.314.6

Репин А.М.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ МНОГОВЕНТИЛЬНЫХ СХЕМ

КЛАССА $\mathcal{E}km\ell R//C_\infty$

Депонированная рукопись

Минск – 1978

1. Основные обозначения и цель. В [1] показана актуальность исследования многовентильных схем с ёмкостным ($R//C$) фильтром при учёте *внутренних* индуктивностей ℓ_μ ($\mu = 1, 2, \dots, m$ или $\forall \mu \in [1, m]$). Для определенности и сокращения изложения такой класс схем с синусоидальными ЭДС S_μ обозначен по [2–4] в виде $Sm\ell R//C$.

К настоящему времени по схемам класса $Sm\ell R//C_\infty$ рассмотрен лишь режим *прерывистого* выходного тока [1], для краткости обозначаемый далее в виде $P \subset \mathbf{3}$ ($P \in \mathfrak{Z}$ [3, 9, 2, 4, 1]). В [1–4] показано, что при определенных сочетаниях параметров, схемы с $R//C$ -фильтром работают также в режимах *непрерывного* тока, в частности в *коммутационных* режимах, когда за интервал \mathfrak{D}_n повторяемости процессов в работе одновременно участвует (коммутирует) то $k + 1$, то k внутренних ветвей (фаз трансформатора, вентилях и других элементов). Вводя $k^\pm = k \pm 1$, получаем, что интервал \mathfrak{D}_n в k -м режиме содержит два подинтервала коммутации: k -й и k^- -й. Обозначим такие состояния в виде $P \subset K_k, \forall k \in [1, k_x]$ [2,4].

Длительное время в литературе не предполагалось о режимах $P \subset K$ в схемах с ёмкостью, условие о режиме $P \subset \mathbf{3}$ специально не оговаривалось, а получаемые для $P \subset \mathbf{3}$ результаты автоматически использовались при любых значениях схемных элементов.

Применительно к схемам класса $Sm\ell R//C_\infty$ в [1] показано, что при $m > 1$ преимущественная часть из возможных состояний относится к коммутационным. Однако сведений о $P \subset K$ в [1] не дано, что сдерживает разработку общих методов их расчёта, затрудняя проектирование.

В данной работе предпринята попытка устранить этот пробел, рассмотрев на единой физико-математической основе все k -е состояния схем класса $EkmlR//C_\infty$ при произвольной \mathcal{E}_μ (здесь конец стр. 1 в оригинале – А.М.Р.)

и синусоидальной S_μ формах ЭДС в широком диапазоне изменения параметров ℓ_μ и R , а также частоты $\omega = 2\pi f$ и амплитуды $\mathcal{E}_{a\mu}$ фазных ЭДС. Тем самым выяснены все параметрические состояния схем с ёмкостным фильтром и внутренними индуктивностями, возникающие при толерансных (от 0 до ∞) значениях параметров входящих в схемы элементов. Основное внимание уделено методам и средствам анализа, как наиболее важной части любых исследований, что позволило в рамках одной статьи изложить результаты, оказывающиеся при обычном изложении [5–7] весьма объёмными.

2. Схемы замещения и методические основы анализа. Схема замещения многовентильных устройств класс $EkmlR//C$ приведена на рис.1а. Стрелки указывают направления переменных, принятые положительными. Изображена лучевая схема. Отличия в работе мостовых схем не принципиальны. Их внутренние ветви могут содержать одни и те же реальные элементы, но одновременное участие в k -х режимах нескольких вентилях сохраняется.

Анализ вентильных устройств обычно достаточно сложен из-за присутствия нелинейных элементов (НЭ), особенно при нескольких НЭ, работающих одновременно. Известно много работ, в той или иной мере разрешающих эти вопросы. Однако практически во всех случаях изучение многовентильных схем не терпит шаблона и требует изобретательности.

Укажем ряд полезных приёмов, благодаря которым удаётся при анализе схем класса $EkmlR//C$ (и подобных ему) существенно снизить трудоемкость исследователя и объём изложения. (с.2)

а) Об относительном эквиваленте и числе независимых параметров. Можно намного упростить выкладки и, как следствие, облегчить труд и уменьшить объём, если еще до начала анализа видоизменить схему рис.1а, переведя её из размерной системы в безразмерную. Преобразованная или приведенная к основаниям, алгебраическая схема становится относительным эквивалентом (ОТЭ) своего оригинала, создавая удобства на всех этапах исследования, включал синтез [4, 10, 1].

Для схем класса $EkmlR//C$ в качестве оснований можно принять: для потенциальных величин – амплитуду фазных ЭДС $\mathcal{O}_u \subset \mathcal{E}_a$ или $\mathcal{O}_u \subset S_a$; для сопротивлений – $\mathcal{O}_z \subset x = \omega \ell$. Тогда, согласно закону $\mathcal{O}_i = \mathcal{O}_u / \mathcal{O}_z$, основание для токов равно $\mathcal{O}_i = \mathcal{E}_a / x$. Дальнейший анализ проведен в безразмерной системе.

Наряду с упрощением промежуточных выкладок, окончательных соотношений переменных, выражений режимных показателей, построения форм переменных и расчетных номограмм, выполнения расчетов на ЭВМ и т.д., метод ОТЭ с самого начала позволяет исследовать схемы через некоторые обобщенные, безразмерные параметры, абстрагируясь от конкретных требований, предъявляемых к схемам.

Именно такие параметры, а не значения отдельных элементов схем, полностью определяют физические состояния устройств и потому они называются далее *определяющими* [2, 4, 14].

ОТЭ для μ -й ветви схем рис.1а дан при $C \rightarrow \infty$ на рис.1б, где $\delta_R = R/x = 1/g_R$ – обобщённый декремент внутренней ветви и нагрузки, инверсный обобщённой постоянной времени g_R . Условие $C \rightarrow \infty$ равносильно допущению $u_C = U_0 - \text{const}$, снижая на единицу порядок уравнений (или на число, равное порядку уравнения, описывающего эквивалентную электрическую цепь вместе со всеми реактивными элементами между выводами выпрямителя и нагрузкой). (конец с.3 оригинала)

Таким образом, $3\mu + 2$ независимых параметров $\mathcal{E}_{a\mu}, f_\mu, \ell_\mu, R, C$ ($\forall \mu \in [1, k^+], \forall k \in [0, k_x]$), фигурировавших в исходной схеме, сводятся при принятой ниже симметрии к **одному** определяющему параметру $g_R = 1/\delta_R$, что и создает существенные удобства и упрощения.

б) О линейности элементов и ключевой замене вентилях. Система ЭДС $\mathcal{E}_\mu = \mathcal{E}(\vartheta + \psi_\mu)$ с начальными фазами ψ_μ и индуктивностями ℓ_μ принята далее линейной, как и элементы фильтра R, C . Нелинейные (реальные) ампер-вольтовые характеристики (АВХ) вентилях заменены идеальными двухлинейными, что позволяет представить реальные вентили безынерционными ключами (рис.1б) с нулевым сопротивлением в замкнутом состоянии и бесконечным в разомкнутом. Переключение вентилях из проводящего состояния в непроводящее и обратно самопроизвольное, при напряжении анод-катод $u_{ак} = 0_{-,+}$ (точнее, 0_{\mp} . – А.М.Р.).

Радиус кривизны идеальной АВХ равен бесконечности в точке излома, в связи с чем многоключевая схема рис.1б является предельно нелинейной и не описываемой аналитически в непрерывной форме. Однако ключевая замена вентилях позволяет рассматривать схему рис.1а с m нелинейными элементами как систему с дискретно меняющимися **линейными** структурами и потому воспользоваться важными достоинствами методики “припасовывания”, разработанной для цепей с одним НЭ академиком Н.Д. Папалекси еще в 1912 г. [8]. (**P.S.** В действительности, великим Стейнметцем (Charles Proteus Steinmetz, 9.4.1865-26.10.1923) в 1890 г. – А.М.Р.).

Не менее важным, с позиций практических приложений, является также то обстоятельство, что именно ключевая замена вентилях позволит нам в дальнейшем перейти от **существенно нелинейной** структуры с $k^+ = k + 1$ НЭ, работающими одновременно, (конец с.4) к эквивалентной **линейной** цепи (автор называет её *коммутационным эквивалентом*, КЭ [2, 4, 9, 10, 14]), анализ которой оказывается простым [4]. (с.4)



Из сети Интернет

2-71
А.М. Репин

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ МНОГОВЕНТИЛЬНЫХ СХЕМ

КЛАССА $\mathcal{E}km\mathcal{E}RHC_{\infty}$

«ЭЛЕКТРИКА»
Поступило в редакцию
1977 г.
№ 562 10 Рис. 2

I. Основные обозначения и цель. В [1] показана актуальность исследования многовентильных схем с емкостным (RHC) фильтром при учете внутренних индуктивностей \mathcal{L}_{μ} ($\mu = 1, 2, \dots, m$). Для определенности и сокращения изложения такой класс схем с синусоидальными эдс S_{μ} обозначен по [2-4] в виде $\mathcal{S}m\mathcal{E}RHC$.

3-33, русск.
протискал,
не при

К настоящему времени по схемам класса $\mathcal{S}m\mathcal{E}RHC_{\infty}$ рассмотрен лишь режим прерывистого выходного тока [1], для краткости обозначаемый далее в виде $\mathcal{P} \subset \mathcal{Z}$ [3, 9, 2, 4, 1]. В [1-4] показано, что при определенных сочетаниях параметров, схемы с RHC фильтром работают также в режимах непрерывного тока, в частности в коммутационных режимах, когда за интервал повторяемости процессов $\mathcal{U}_{\bar{k}}$ в работе одновременно участвует (коммутирует) то $\bar{k} + 1$, то \bar{k} внутренних ветвей (фаз трансформатора, вентилей и других элементов). Вводя $\bar{k}^{\pm} = \bar{k} \pm 1$, получаем, что интервал $\mathcal{U}_{\bar{k}}$ в \bar{k} -м режиме содержит два подинтервала коммутации: \bar{k} -й и \bar{k}^{-} -й. Обозначим такие состояния в виде $\mathcal{P} \subset \mathcal{K}_{\bar{k}}$ ($\bar{k} = 1, 2, \dots, k_{\bar{k}}$) [2, 4].

\mathcal{U} -эта
 \mathcal{E} -знак

Длительное время в литературе не предполагалось о режимах $\mathcal{P} \subset \mathcal{K}_{\bar{k}}$ в схемах с емкостью, условие о режиме $\mathcal{P} \subset \mathcal{Z}$ специально не оговаривалось, а получаемые для $\mathcal{P} \subset \mathcal{Z}$ результаты автоматически использовались при любых значениях схемных элементов.

\mathcal{L} -эле,
не \mathcal{E}

Применительно к схемам класса $\mathcal{S}m\mathcal{E}RHC_{\infty}$ в [1] показано, что при $m > 1$ преимущественная часть из возможных состояний относится к коммутационным. Однако сведений о $\mathcal{P} \subset \mathcal{K}_{\bar{k}}$ в [1] не дано, что сдерживает разработку общих методов их расчета, затрудняя проектирование.

\mathcal{L} - пропущен,
заглавн.
не \mathcal{E}

В данной работе предпринята попытка устранить этот пробел, рассмотрев на единой ^{терминологической и} физико-математической основе все \bar{k} -е состояния схем класса $\mathcal{E}km\mathcal{E}RHC_{\infty}$ при произвольной \mathcal{L}_{μ} и синусоидальной S_{μ} ф

мах эдс в широком диапазоне изменения параметров L_{Σ} и R , а также частоты $\omega = 2\pi f$ и амплитуды ξ_{Σ} фазных эдс. Тем самым выяснены все параметрические состояния схем с емкостным фильтром и внутренними индуктивностями, возникающие при любых (от 0 до ∞) значениях параметров входящих в схемы элементов. Основное внимание уделено методам и средствам анализа, как наиболее важной части любых исследований, что позволило в рамках одной статьи изложить результаты, оказывающиеся при обычном изложении [5-7] весьма объемными.

2. Схемы замещения и методические основы анализа. (модель) Схема замещения многовентильных устройств класса $\xi_{k m} \ell R I I C$ приведена на рис. 1а. Стрелки указывают направления переменных, принятые за положительные. Изображена лучевая схема. Отличия в работе мостовых схем не принципиальны. И внутренние ветви могут содержать одни и те же реальные элементы, но одновременное участие в k -х режимах нескольких вентилях сохраняется.

Анализ вентильных устройств обычно достаточно сложен из-за присутствия нелинейных элементов (НЭ), особенно при нескольких НЭ, работающих одновременно. Известно много работ, в той или иной мере разрешающих эти вопросы. Однако практически во всех случаях изучение многовентильных схем не терпит шаблона и требует изобретательности.

Укажем ряд полезных приемов, благодаря которым удается при анализе схем класса $\xi_{k m} \ell R I I C$ (и подобных ему) существенно снизить трудоемкости исследователя и объем изложения.

а/ Об относительном эквиваленте и числе независимых параметров. Можно намного упростить выкладки и, как следствие, облегчить труд и уменьшить объем, если еще до начала анализа видоизменить схему рис. 1а, переводя ее из размерной системы в безразмерную. Преобразованная или приведенная к основаниям, алгебраическая схема становится относительным эквивалентом (ОТЭ) своего оригинала, создавая удобства на всех этапах исследования, включая синтез [4, 10, 1].

Для схем класса $\xi_{k m} \ell R I I C$ в качестве оснований можно принять: для потенциальных величин - амплитуду фазных эдс $U_u = \xi_{\Sigma}$ или S_{Σ} ; для сопротивлений

$\tilde{u} - u(\text{н.т.}),$
не и

лений $-O_z = x = \omega l$. Тогда согласно закону $O_i = O_u / O_z$ основание для токов равно $O_i = \xi / x$. Дальнейший анализ проведен в безразмерной системе.

Наряду с упрощением промежуточных выкладок, окончательных соотношений переменных, выражений режимных показателей, построения форм переменных и расчетных номограмм, выполнения расчетов на ЭВМ и т.д., метод ОТЭ с самого начала позволяет исследовать схемы через некоторые обобщенные, безразмерные параметры, абстрагируясь от конкретных требований, предъявляемых к схемам.

Именно такие параметры, а не значения отдельных элементов схем, полностью определяют физические состояния устройств и потому они называются в дальнейшем определяющими [2, 4, 14].

ОТЭ для μ -й ветви схем рис. 1а дан при $C \rightarrow \infty$ на рис. 1б, где $\delta_R = R / x = 1 / g_R$ - обобщенный декремент внутренней ветви и нагрузки, инверсный обобщенной постоянной времени g_R . Условие $C \rightarrow \infty$ равносильно допущению $\bar{U}_{\xi} = U_0 = const$, снижая на единицу порядок уравнений.

Таким образом, $3\mu + 2$ независимых параметров $\xi_{a\mu}, f_{\mu}, l_{\mu}, R, C$, фигурировавших в исходной схеме, сводятся при принятой ниже симметрии к одному определяющему параметру $g_R = 1 / \delta_R$, что и создает существенные удобства и упрощения.

о/0 линейности элементов и ключевой замене вентиляй. Система эдс $\xi_{\mu} = \xi (\psi + \psi_{\mu})$ с начальными фазами ψ_{μ} и индуктивностями l_{μ} принята далее линейной как и элементы фильтра R, C . Нелинейные (реальные) авх вентиляй заменены идеальными двухлинейными, что позволяет представить реальные вентили безынерционными ключами (рис. 1б) с нулевым сопротивлением в замкнутом состоянии и бесконечным в разомкнутом. Переключение вентиляй из проводящего состояния в не- и обратнопроводящее - самопроизвольное, при напряжении а_н-од-катод $\bar{U}_{ak} = 0 \mp$.

Радиус кривизны идеальной авх равен бесконечности в точке излома, в связи с чем многоключевая схема рис. 1б является предельно нелинейной и неопределяемой аналитически в непрерывной форме. Однако ключевая за-

мена вентиля позволяет рассматривать схему рис. 1а с m нелинейными элементами как систему с дискретно меняющимися линейными структурами и тем самым позволяет воспользоваться важными достоинствами методики припасовывания, разработанной для цепей с одним НЭ акад. Папалекси Н. Д. еще в 1912 г. [8].

Не менее важным с позиций практических приложений является также то обстоятельство, что именно ключевая замена вентиля позволит нам в дальнейшем перейти от существенно нелинейной структуры с $\bar{k}+1$ НЭ, растающими одновременно, к эквивалентной линейной цепи (мы называем ее коммутационным эквивалентом /КЭ/), анализ которой оказывается простым [4].

в/0 возможности рекуррентного анализа всех режимов и схем. В вентильных устройствах обычно изучают каждый режим в отдельности и, как правило, по каждой схеме [5-7], что очень объемно. Применение метода КЭ позволяет в рекуррентной форме исследовать всю совокупность схем и режимов, примерно в $m\bar{k}_x$ раз снижая трудоемкость и объем [4, 9, 10, 14].

г/0 числе анализируемых структур. При двухлинейных авх за период анализируют обычно две разные структуры, припасовывая решения в моменты смены структур с тем, чтобы найти эти моменты (например, начало открытия вентиля $\bar{\psi}$, угол коммутации $\bar{\gamma}$, длительность открытого состояния вентиля $\bar{\Lambda}$ и пр.), а также начальные условия или постоянные интегрирования, обусловленные начальными зарядами в реактивных элементах.

Мы покажем далее, что в силу свойственной методу КЭ рекуррентности можно ограничиться анализом лишь одной структуры, а именно, для \bar{k} -го подинтервала коммутации. Для \bar{k}^1 -го подинтервала, смежного внутри периода с \bar{k} -м, достаточно в полученных соотношениях заменить \bar{k} на \bar{k}^1 , что при прочих равных условиях примерно в два раза снижает выкладки и объём.

д/0 числе искомым неизвестных. Так как структуры схем, соответствующие отдельным отрезкам линеаризированных авх, являются линейными, их анализ осуществим любыми методами линейной теории. В этом заключено одно из важнейших достоинств методики припасовывания, широко применяемой в анализе нелинейных устройств. Однако поиск в общем случае i_x перемен

$\frac{1}{3}$ -к-си
 ных линейной цепи \tilde{z}_x -го порядка (зависящего от числа реактивных элементов) требует по известной методике определения $i_x \tilde{z}_x$ неизвестных, что в нашем случае неприемлемо.

Более рационален прием [3, 4, I], связанный с поиском прежде всего некоторой переменной, называемой исходной [4, II], через которую остальные переменные находятся уже без операций интегрирования. В качестве исходной целесообразно выбирать риджитную переменную, например ток индуктивности или напряжение емкости. В этом случае при типовых воздействиях (у нас - при типовых эдс) решение линейной цепи сводится к поиску \tilde{z}_x ^[III]корней. Но применительно к схемам класса ЭкмЛРИС здесь обнаруживается дальнейшее упрощение. Оказывается, что хотя структура этих схем в \tilde{k} -м подинтервале содержит $\tilde{k}+2$ реактивных элементов, при принятых условиях возможен очень простой прием, изложенный далее, приводящий к решению уравнения всего лишь первого порядка.

е/0 начальных условиях. Начальные условия, обусловленные начальными зарядами в L и C элементах, находят в кусочных задачах из стыков решений, полученных за период для разных структур.

Для $\tilde{k}+1$ вентильных структур, подобных рис. I, одно- или многозвенный фильтр которых начинается с конденсатора в поперечной ветви, начальное напряжение $\bar{U}_{C(k)}(0)$ в любом \tilde{k} -м режиме можно легко найти независимо от характера внутренних сопротивлений из простых физических соображений, не прибегая к указанной, обычной для нелинейных цепей процедуре. Действительно, из рис. Iб видно, что $\bar{U}_{C(k)}(0)$ равно значению эдс $\bar{E}_M(k)(0)$ в ветви открывающимся вентилем. Это дополнительно упрощает решение.

Более того оказывается, и мы покажем это, что решение задачи возможно без предварительного поиска начальных зарядов в $\tilde{k}+1$ внутренних индуктивностях, что также намного упрощает анализ, снижая трудоемкость.

ж/0 числе периодов. Для изучения параметрической динамики процессов достаточно рассмотреть лишь стационарные режимы. Нередко такие состояния в схемах с индуктивной или на противо-эдс нагрузкой анализируются

в общем виде для h периодов [12,13], что ведет к излишнему усложнению.

В силу периодичности стационарных процессов достаточно рассмотреть лишь один период и тем самым получить более простые выражения.

з/ Об отсчете эдс и симметрии ветвей. Отсчет эдс $\underline{\xi}_\mu$ с амплитудами $\underline{\xi}_{a\mu}$ и фазами $\underline{\psi}_\mu$ удобно вести справа налево на временной диаграмме. Тогда при соблюдении полной симметрии ветвей - фазово-амплитудной симметрии эдс и равенстве индуктивностей - имеем при $\underline{\mu}^\pm = \underline{\mu} \pm 1, \underline{\mu} = 1, 2, \dots, m$

$$\underline{\xi}_{a\mu} = \underline{\xi}_{a\mu}, \underline{S}_{a\mu} = \underline{S}_{a\mu}, \underline{\psi}_\mu = 2\mu\theta, \underline{l}_\mu = \underline{l}. \quad / 1 /$$

В этом случае огибающая фазных эдс изменяется периодически с полупериодом $\theta = \pi / m$, а длительность подинтервалов \underline{k} и \underline{k}^c равна 2θ . Поэтому достаточно найти лишь угол $\underline{\gamma}_{\underline{k}}$ (при $\underline{k} = 0$ - угол Λ) с тем, чтобы однозначно вычислить $\underline{\gamma}_{\underline{k}^c}$ как $2\theta - \underline{\gamma}_{\underline{k}}$, а $\Lambda_{\underline{k}}$ как $2k\theta + \underline{\gamma}_{\underline{k}}$. Все это упрощает выкладки и соотношения.

Пречисленный комплекс приемов, отличающихся практической полезностью, удобством и простотой, позволяет предельно минимизировать затраты труда и объем изложения на всех этапах исследования вентильных схем от анализа до машинного проектирования. Убедимся в этом на примере анализа схем рассматриваемого класса.

3. Расчет переменных и критические состояния схем класса $\underline{\xi}(S)kmlRlIC_{\infty}$.

Определив по теореме Эйлера-Листинга число независимых контуров в схеме рис. 1б, находим, что в \underline{k} -м подинтервале коммутации структура схем класса $\underline{\xi}kmlRlIC$ описывается системой из $\underline{k}+1$ дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned} & \underline{\xi}'_{\mu}(\underline{k}) - i'_{\mu}(\underline{k}) - \underline{U}'_{\underline{c}}(\underline{k}) = 0, (\underline{\mu} = 1, 2, \dots, \underline{k}^+; \underline{k} = 0, 1, \dots, \underline{k}_x) \quad / 2 / \\ \text{или при } & \underline{U}'_{\underline{c}}(\underline{k}) = \underline{U}'_{0}(\underline{k}), \text{ принятом выше,} \\ & i'_{\mu}(\underline{k}) = \underline{\xi}_{\mu}(\underline{k}) - \underline{U}'_{0}(\underline{k}). \quad / 3 / \end{aligned}$$

В связи с наличием индуктивностей ток i_{μ} является риджитной переменной, для которой справедлив закон

$$R_{rig}(0)_{\underline{0}} = 0, \quad / 4 /$$

где индекс $\underline{0}$ соответствует нулевым начальным условиям.

До момента замыкания ключей \underline{k}_{μ} индуктивности \underline{l}_{μ} отключены от нагруз-

ки, и начального заряда в них нет. Следовательно, согласно /4/

$$\underline{i}_{\mu(\kappa)}(-2\mu-\theta) = 0. \quad / 5 /$$

Так как $\int_a^b y' d\underline{v} = y(a) - y(b)$

или при $y(b) = 0$ $y(a) = \int_a^b y' d\underline{v}$, / 5' /

то с учетом /5/ и /3/ из /5'/ получаем

$$\underline{i}_{\mu(\kappa)} = \int_{-2\mu-\theta}^{\underline{v}} \underline{i}'_{\mu(\kappa)} d\underline{v} = \int_{-2\mu-\theta}^{\underline{v}} (\underline{\xi}_{\mu(\kappa)} - U) d\underline{v}. \quad / 6 /$$

При $\underline{\xi}_{\mu(\kappa)} = \underline{S}_{\mu(\kappa)} = \sin(\underline{v} + \underline{\Psi}_{\kappa} + 2\mu-\theta)$ / 7 /

это дает $\underline{i}_{\mu(\kappa)}(\underline{v}) = \cos \underline{\Psi}_{\kappa} - \cos(\underline{v} + \underline{\Psi}_{\kappa} + 2\mu-\theta) - (\underline{v} + 2\mu-\theta) U_{0(\kappa)}$, / 8 /

где $\underline{v}_{\kappa} = 0, 1, \dots, \underline{\kappa}$; $\mu = 1, 2, \dots, \underline{\kappa}^+$;

Отсюда начальные токи в μ -х ($\mu = 1, 2, \dots, \underline{\kappa}^+$) индуктивностях равны

$$\underline{i}_{\mu(\kappa)}(0) = 2 [\sin \mu-\theta \sin(\underline{\Psi}_{\kappa} + \mu-\theta) - \mu-\theta U_{0(\kappa)}], \quad / 9 /$$

а начальное напряжение на емкости

$$U_{0(\kappa)} = \frac{\sin \underline{\Psi}_{\kappa}}{\underline{\kappa}} \quad / 10 /$$

находится из упомянутого выше условия $\underline{S}_{1(\kappa)}(0) = \underline{U}_{C(\kappa)}(0) = U_{0(\kappa)}$

Итак, мы довольно просто получили компактные, благодаря рекуррентности, и, вместе с тем, общие соотношения, пригодные для расчета любого μ -го тока m -фазных схем с $\underline{\ell}_{\mu}$ и RIC фильтром, работающих в любом $\underline{\kappa}$ -м подинтервале коммутации. Наряду с простотой и значительной информативностью соотношений важным является тот факт, что окончательные выражения для токов выведены без предварительного поиска начальных условий в $\underline{\kappa}+2$ перезаряжаемых одновременно реактивных элементах, как, напротив, следовало бы поступить при традиционном применении классической теории по решению дифференциальных уравнений.

Теперь остальные переменные, производные от исходной, находятся просто, поскольку не связаны с интегрированием,

$$\underline{u}_{\mu(\kappa)}(\underline{v}) = \underline{i}'_{\mu(\kappa)}(\underline{v}) = \underline{\xi}_{\mu(\kappa)}(\underline{v}) - U_{0(\kappa)} = \underline{S}_{\mu(\kappa)}(\underline{v}) - U_{0(\kappa)} \quad / 11 /$$

$$\underline{i}_{H(\kappa)}(\underline{v}) = \sum_{\mu=1}^{\underline{\kappa}^+} \underline{i}_{\mu(\kappa)} = \sum_{\mu=1}^{\underline{\kappa}^+} \int_{-2\mu-\theta}^{\underline{v}} (\underline{\xi}_{\mu(\kappa)} - U) d\underline{v} = \quad / 12 /$$

$$= k^+ \cos \bar{\Psi}_k - S_a^{(k)} \cos(\bar{\nu} + \bar{\Psi}_k + k\theta) - (k^+ \bar{\nu} + 2k\theta) U_{0(k)}; S_a^{(k)} = \sin k^+ \theta / \sin \theta,$$

$$\bar{i}_{c(k)}(\bar{\nu}) = \bar{i}_{H(k)}(\bar{\nu}) - I_{0(k)} = \bar{i}_{H(k)}(\bar{\nu}) - g \frac{\sin \Psi_k}{\bar{\gamma}_k}, \quad / 13 /$$

$$\bar{U}_{c(k)}(\bar{\nu}) = U_{c(k)} = \frac{\sin \Psi_k}{\bar{\gamma}_k}. \quad / 14 /$$

Соотношения /11-14/ даны как для произвольных, так и синусоидальных эдс.

С целью получения окончательной информации о \bar{k} -м режиме, т.е. для соотношений \bar{k} -го подинтервала коммутации, достаточно в приведенных выражениях заменить \bar{k} на \bar{k}^- /при $\bar{k} > 0$ /.

На этом задачу анализа можно считать законченной. Необходимые для проектирования схем режимные показатели находим известными способами на основе полученных выражений. Например, среднее значение тока полезной нагрузки равно

$$I_{0(k)} = \frac{1}{2\theta} \left[\int_0^{\bar{\gamma}_k} \bar{i}_{H(k)} + \int_{\bar{\gamma}_k}^{2\theta} \bar{i}_{H(k^-)} \right] d\bar{\nu} =$$

$$= \frac{1}{2\theta} \left[\sum_{\mu=1}^{k^+} \int_0^{\bar{\gamma}_k} \int_{-2\mu\theta}^{\bar{\nu}} + \sum_{\mu=1}^k \int_{\bar{\gamma}_k}^{2\theta} \int_{-2\mu\theta}^{\bar{\nu}} \right] (\bar{\varepsilon}_{\mu(k)} - U_0) d\bar{\nu} d\bar{\nu},$$

значит
большая
или
малая

или при $\bar{\varepsilon}_{\mu} = \delta_{\mu}$, $\bar{\gamma}_k = \bar{\gamma}_k / 2$ после преобразования имеем

$$I_{0(k)} = \frac{\sin^2(\bar{\gamma}_k + k\theta)}{\sin \Psi_k} - [(3k-2)\theta^2 + (2\theta + \bar{\gamma}_k)\bar{\gamma}_k] U_{0(k)} / 15 /$$

Иначе

$$I_{0(k)} = g \frac{\sin \Psi_k}{\bar{\gamma}_k}. \quad / 16 /$$

Приведенные или зависящие от них величины являются функциями моментов переключения вентилей $\bar{\Psi}_k$ и $\bar{\gamma}_k$. Уравнения связи этих моментов с определяющим параметром g_R находим следующим образом. По условию $\bar{i}_{k^+(k)}(\bar{\gamma}_k) = 0$ при $\bar{k} = 0, 1, \dots, k_x$ из /8/ получаем

$$\sin(\bar{\gamma}_k + k\theta) \sin(\bar{\gamma}_k + k\theta + \bar{\Psi}_k) = (\bar{\gamma}_k + k\theta) \sin \bar{\Psi}_k \quad / 17 /$$

или

$$\text{ctg} \bar{\Psi}_k = (\bar{\gamma}_k + k\theta) / \sin^2(\bar{\gamma}_k + k\theta) - \text{ctg}(\bar{\gamma}_k + k\theta). \quad / 18 /$$

каждое
на мал
каждое
большая
зат, не
т

В частности, при $\bar{k} = 0$ /18/ дает выражение для угла $\bar{\gamma}_0 = \bar{\lambda}_0$, полученное в [1] для режима $P = 3$. При $\bar{k} > 0$ угол $\bar{\lambda}_k = 2k\theta + \bar{\gamma}_k$, и принципиально важная закономерность $\bar{\lambda}_k > \bar{\lambda}_{jc}$ ($\bar{\lambda}_{jc}$ - время заряда емкости), выявленная в [3, 9, 4, 1] для других классов схем с емкостью, здесь тем более проявляется, поскольку емкость за время $\bar{\lambda}_k$ перезаряжается $2k + 1$ раз.

Уравнение /18/ содержит два неизвестных. Другое уравнение находим из /15,16/

$$\theta g_R = \left(\frac{\sin(\bar{f}_k + k\theta)}{\sin \bar{\psi}_k} \right)^2 - (3k-2)\theta^2 - (2\theta + \bar{f}_k) \bar{f}_k. \quad / 19 /$$

Заменяя в /19/ $\frac{\sin(\bar{f}_k + k\theta)}{\sin \bar{\psi}_k}$ из /18/ и обозначая $\beta_k = \bar{f}_k + k\theta$, приходим к замкнутому относительно \bar{f}_k уравнению лишь с одним неизвестным

$$\theta g_R - 1 = \left(\frac{\beta_k}{\sin \beta_k} \right)^2 - \frac{2\beta_k}{\operatorname{tg} \beta_k} - \theta^2 - (2\theta - \bar{f}_k) \bar{f}_k. \quad / 20 /$$

Решая /20/ в числах (на ЭВМ) и подставляя результаты в /18,16/ и другие соотношения, получаем массивы табулированных значений $\bar{\psi}_k, \bar{f}_k, I_0$ и пр. в зависимости от одного обобщенного параметра g_R . Построенные при этом номограммы существенно снижают трудоемкость проектировщика.

Нам остается определить критические параметры схемных элементов, соответствующие переходу схем из одного коммутационного режима в другой [2, 4, 10, 14, 1]. По условию $\bar{f}_k = f_{kp(k)} = \theta$ из /20/ получаем

$$\theta g_{R kp(k)} - 1 = (k^2 \theta / \sin k^2 \theta)^2 - 2k^2 \theta \operatorname{ctg} k^2 \theta - 3k^2 \theta^2. \quad / 21 /$$

Видно, что $g_{R kp(k)}^{(m)} = f(m, k)$.

Алгоритм оценки типа режима прост "

$$g_R(k) \lesseqgtr g_{R kp(k)} \rightarrow \begin{matrix} P \subset K_k \\ P \subset K_{k^2} \end{matrix}$$

Итак, мы полностью выяснили параметрическую динамику физических состояний схем с емкостным фильтром при любом числе внутренних ветвей, содержащих источники эдс, индуктивности и вентили, при изменении индуктивностей от 0 до ∞ и нагрузки в предельно возможном диапазоне - от холостого хода до короткого замыкания. Упрощенная блок-схема машинной программы дана ниже.

1. Выводы. В статье изложен комплекс методических приемов, отличающихся практической полезностью, эффективностью и простотой при исследовании многовентильных структур различных классов.

2/ На примере схем класса $\mathcal{E}(S)km^lRиC_\infty$ показано, что применение интерметодического способа позволяет существенно снизить исследователя трудоемкость и объем изложения при изучении параметрических состояний многовентильных структур с толерансными параметрами.

3/ Согласно [2-4] показано, что, в отличие от распространенных представлений, многовентильные схемы с емкостным фильтром работают не только в режимах прерывистого выходного тока, но также в коммутационных k -го порядка режимах. Тем самым выявлены новые физические состояния рассмотренных схем.

4/ Получены простые и вместе с тем общие соотношения, в рекуррентном виде охватывающие все физические состояния схем класса $\xi(S)km\ell RII\infty$ ($k = 0, 1, \dots, k_x$; $m = 1, 2, \dots, m_x$), возможные при любых /от 0 до ∞ / значениях обобщенной постоянной времени $g_R = \omega l / R$.

5/ Установлено, что, в отличие от традиционных предположений, длительность заряда (разряда) емкости, перезаряжающейся за Λ_k $2k+1$ раз, всегда меньше (больше) длительности открытого Λ_k (закрытого) состояния вентилей, что открывает новые, принципиально важные возможности по выявлению и трактовке физической сущности процессов в схемах с емкостными накопителями.

6/ Для схем класса $Skm\ell RII\infty$, впервые в аналитическом виде получены расчетные соотношения критических параметров, позволяющие в инженерной практике намного удобнее, чем экспериментально, определять тип режима, в котором работает реальное или может оказаться проектируемое устройство при данных m и g_R .

7/ С целью существенного облегчения расчетов дана блок-программа машинных решений на ЭВМ. Ее применение позволяет освободить исследователя и разработчика от выполнения трудоемких вычислительных операций, особенно при поверочных или циклических /по методу проб/ расчетах.

11

Литература

1. Репин А. М. Исследование неуправляемых и управляемых схем классов $SmlRII\infty$ и $S\alpha mlRII\infty$ в режиме $P < \mathcal{J}$. Изв. ВУЗов, "Энергетика", 1977, №12.
2. Репин А. М. Критические состояния многовентильных схем различных классов. Материалы нтк ВЗЭС, М., 1970.
3. Лавриченко И. Л., Репин А. М., Собинов К. П. Анализ переходных процессов устройства "источник питания - накопитель - нагрузка". Материалы нтк МЭС, М., 1967.
- 4/ Репин А. М. Исследование параметрических состояний m -фазных преобразователей малой мощности. Автореф. дисс., ВЗЭС, М., 1971.

5/Емельянов В.И.Трехфазная мостовая схема.Изв.НИИПТ,Л.,1961.

6/Размадзе Ш.М.Преобразовательные схемы и системы.Изд."Высшая школа", М.,1967.

7/Бенделиани Н.Д.Анализ электромагнитных процессов в 24-фазной од-
нотакной вентильной схеме.Автореф.дисс.,ГПИ,Тб.,1969.

8/Папалекси Н.Д.О процессах в цепи переменного тока,содержащей элек-
трический вентиль.*Annal. der Physik*, т.39,1912,№15.

9/Белопольский И.И.,Репин А.М.О некоторых особенностях работы много-
вентильных схем при учете внутренних активных сопротивлений.МДНТП,1969.

10/Репин А.М.Выпрямители для РЭА,построенной на микросхемах.МДНТП,М.,
1973.

11/Репин А.М.Формула разложения для произведения изображений и ее
применение в анализе линейных систем.Изв.АН СССР,"Энергетика и транс-
порт",1973,№ 5.

12/ Takeuchi T., Maeda A. Method of Φ -function to analyse
poly-phase half-wave rectifier circuit having SCR in secondary circuit
of transformer. *IEEEJ*, v. 85, 1965, n 918.

13/Здрок А.Г.,Салютин А.А.Выпрямительные устройства электропитания
и управления.Изд."Энергия",М.,1975.

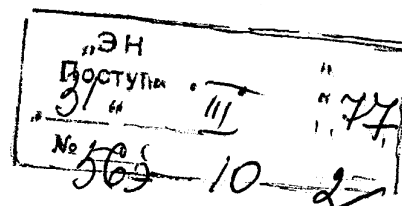
14/ Белопольский И.И.,Репин А.М.,Христианов А.С.Стабилизаторы низких
и милливольтовых напряжений.Изд."Энергия",М.,1974.

=====

УДК 621.314.6

Реферат к статье А.М.Репина "Параметрические состояния
многовентильных схем класса ExtLRRC_{∞} "

Изложен интерметодический способ исследования и рассмотрены на его
основе параметрические состояния k -го порядка m -фазных схем с RRC
фильтром,внутренними индуктивностями L_{μ} , фазными эдс произвольной E_{μ}
и синусоидальной S_{μ} форм,при толерансных /от 0 до ∞ / значениях обоб-
щенной постоянной времени $g_R = \omega L / R$, и $C \rightarrow \infty$.



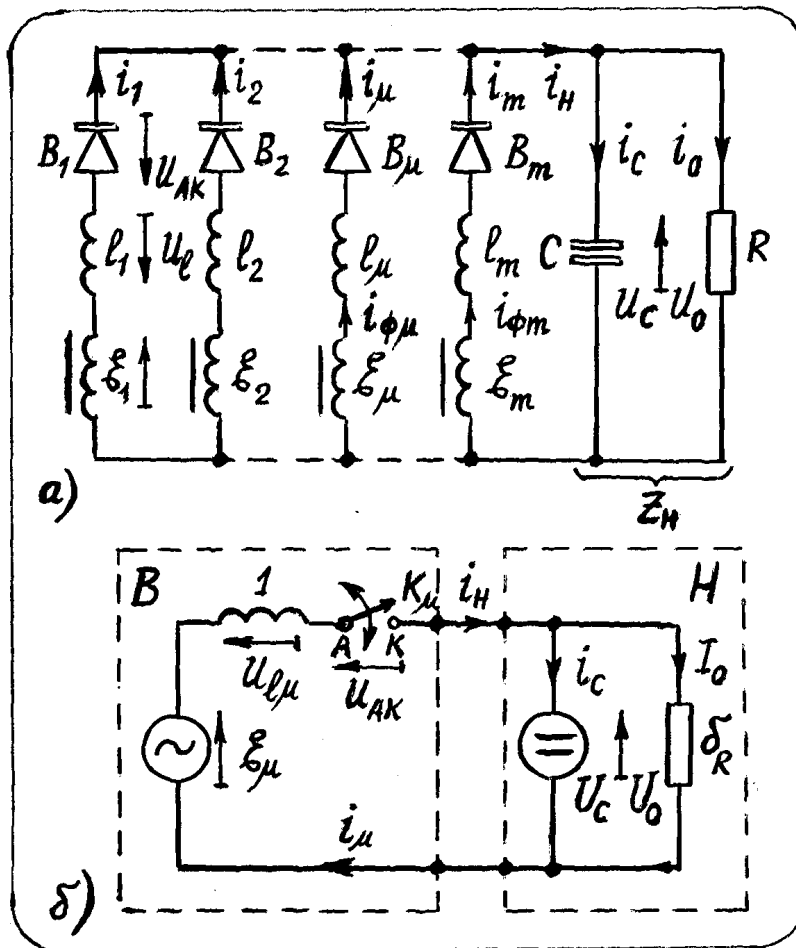


Рис.1.

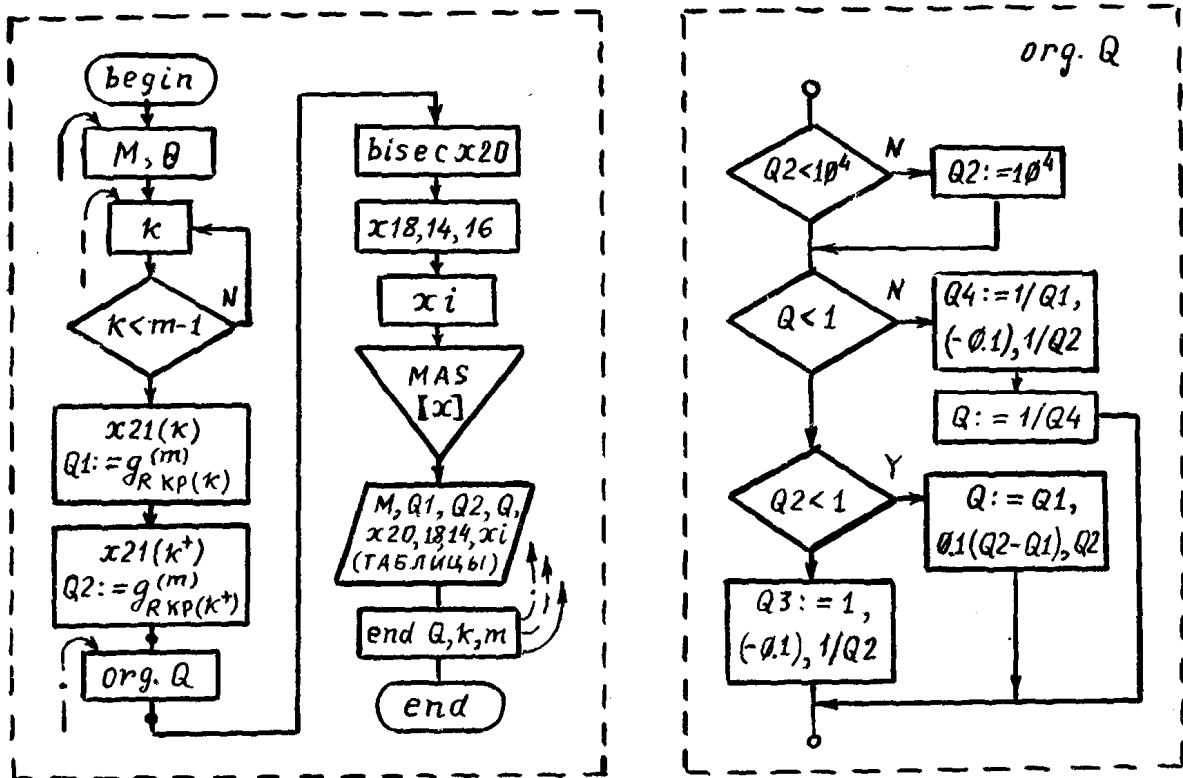


Рис.2

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Редколлегия журнала "Известия высших учебных заведений"

раздел "Энергетика"

УДК 621.314.6

Репин А.М.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ МНОГОВЕНТИЛЬНЫХ СХЕМ

КЛАССА $Ek m \ell R II C_{\infty}$

Минск - 1978

1. Основные обозначения и цель. В [1] показана актуальность исследования многовентильных схем с емкостным (R||C) фильтром при учете внутренних индуктивностей $\ell_\mu (\mu=1, 2, \dots, m)$. Для определенности и сокращения изложения такой класс схем с синусоидальными эдс S_μ обозначен по [2-4] в виде $Sm\ell R||C$.

К настоящему времени по схемам класса $Sm\ell R||C_\infty$ рассмотрен лишь режим прерывистого выходного тока [1], для краткости обозначаемый далее в виде $P \in \mathcal{Z}$ [3, 9, 2, 4, 1]. В [1-4] показано, что при определенных сочетаниях параметров, схемы с R||C фильтром работают также в режимах непрерывного тока, в частности в коммутационных режимах, когда за интервал повторяемости процессов \mathcal{U}_n в работе одновременно участвует (коммутирует) то $k+1$, то k внутренних ветвей (фаз трансформатора, вентиля и других элементов). Вводя $k^\pm = k \pm 1$, получаем, что интервал \mathcal{U}_n в k -м режиме содержит два подинтервала коммутации: k^- -й и k^+ -й. Обозначим такие состояния в виде $P \in K_k$ ($k=1, 2, \dots, k_x$) [2, 4].

Длительное время в литературе не предполагалось о режимах $P \in K$ в схемах с емкостью, условие о режиме $P \in \mathcal{Z}$ специально не оговаривалось, а получаемые для $P \in \mathcal{Z}$ результаты автоматически использовались при любых значениях схемных элементов.

Применительно к схемам класса $Sm\ell R||C_\infty$ в [1] показано, что при $m > 1$ преимущественная часть из возможных состояний относится к коммутационным. Однако сведений о $P \in K$ в [1] не дано, что сдерживает разработку общих методов их расчета, затрудняя проектирование.

В данной работе предпринята попытка устранить этот пробел, рассмотрев на единой физико-математической основе все k -е состояния схем класса $\mathcal{E}km\ell R||C_\infty$ при произвольной \mathcal{E}_μ

и синусоидальной S_{μ} формах эдс в широком диапазоне изменения параметров ℓ_{μ} и R , а также частоты $\omega = 2\pi f$ и амплитуды $E_{a\mu}$ фазных эдс. Тем самым выяснены все параметрические состояния схем с емкостным фильтром и внутренними индуктивностями, возникающие при толерансных (от 0 до ∞) значениях параметров входящих в схемы элементов. Основное внимание уделено методам и средствам анализа, как наиболее важной части любых исследований, что позволило в рамках одной статьи изложить результаты, оказывающиеся при обычном изложении [5-7] весьма объемными.

2. Схемы замещения и методические основы анализа. Схема замещения многовентильных устройств класса $\xi k m \ell R I I C$ приведена на рис. 1а. Стрелки указывают направления переменных, принятые за положительные. Изображена лучевая схема. Отличия в работе мостовых схем не принципиальны. Их внутренние ветви могут содержать одни и те же реальные элементы, но одновременное участие в k -х режимах нескольких вентилях сохраняется.

Анализ вентильных устройств обычно достаточно сложен из-за присутствия нелинейных элементов (НЭ), особенно при нескольких НЭ, работающих одновременно. Известно много работ, в той или иной мере разрешающих эти вопросы. Однако практически во всех случаях изучение многовентильных схем не терпит шаблона и требует изобретательности.

Укажем ряд полезных приемов, благодаря которым удается при анализе схем класса $\xi k m \ell R I I C$ (и подобных ему) существенно снизить трудоемкость исследователя и объем изложения.

а) Об относительном эквиваленте и числе независимых параметров. Можно намного упростить выкладки и, как следствие, облегчить труд и уменьшить объем, если еще до начала анализа видоизменить схему рис.1а, переведя ее из размерной системы в безразмерную. Преобразованная или приведенная к основаниям, алгебраическая схема становится относительным эквивалентом (ОТЭ) своего оригинала, создавая удобства на всех этапах исследования, включая синтез [4,10,1] .

Для схем класса $\mathcal{E}kmlR||C$ в качестве оснований можно принять: для потенциальных величин - амплитуду фазных эдс $O_u = \mathcal{E}_a$ или $O_u = S_a$; для сопротивлений - $O_z = x = \omega l$. Тогда согласно закону $O_i = O_u / O_z$ основание для токов равно $O_i = \mathcal{E}_a / x$. Дальнейший анализ проведен в безразмерной системе.

Наряду с упрощением промежуточных выкладок, окончательных соотношений переменных, выражений режимных показателей, построения форм переменных и расчетных номограмм, выполнения расчетов на ЭВМ и т.д., метод ОТЭ с самого начала позволяет исследовать схемы через некоторые обобщенные, безразмерные параметры, абстрагируясь от конкретных требований, предъявляемых к схемам.

Именно такие параметры, а не значения отдельных элементов схем, полностью определяют физические состояния устройств и потому они называются в дальнейшем определяющими [2,4,14] .

ОТЭ для μ -й ветви схем рис.1а дан при $C \rightarrow \infty$ на рис.1б, где $\delta_R = R/x = 1/g_R$ - обобщенный декремент внутренней ветви и нагрузки, инверсный обобщенной постоянной времени g_R . Условие $C \rightarrow \infty$ равносильно допущению $u_c = U_0 - const$, снижая на единицу порядок уравнений.

Таким образом $3\mu + 2$ ($\mu = 1, 2, \dots, k^+$; $k = 0, 1, \dots, k_x$) независимых параметров $\mathcal{E}_{\mu}, f_{\mu}, \ell_{\mu}, R, C$, фигурировавших в исходной схеме, сводятся при принятой ниже симметрии к одному определяющему параметру $g_R = 1/\delta_R$, что и создает существенные удобства и упрощения.

б) 0 линейности элементов и ключевой замене вентиляей.
Система эдс $\mathcal{E}_{\mu} = \mathcal{E} (\vartheta + \psi_{\mu})$ с начальными фазами ψ_{μ} и индуктивностями ℓ_{μ} принята далее линейной как и элементы фильтра R, C . Нелинейные (реальные) авх вентилей заменены идеальными двухлинейными, что позволяет представить реальные вентили безынерционными ключами (рис. 1б) с нулевым сопротивлением в замкнутом состоянии и бесконечным в разомкнутом. Переключение вентилей из проводящего состояния в непроводящее и обратно самопроизвольное, при напряжении анод-катод $U_{ak} = 0_{\mp}$.

Радиус кривизны идеальной авх равен бесконечности в точке излома, в связи с чем многоключевая схема рис. 1б является предельно нелинейной и неопределяемой аналитически в непрерывной форме. Однако ключевая замена вентилей позволяет рассматривать схему рис. 1а с m нелинейными элементами как систему с дискретно меняющимися линейными структурами и тем самым позволяет воспользоваться важными достоинствами методики припасовывания, разработанной для цепей с одним НЭ акад. Папалекси Н. Д. еще в 1912 г. [8].

Не менее важным с позиций практических приложений является также то обстоятельство, что именно ключевая замена вентилей позволит нам в дальнейшем перейти от существенно нелинейной структуры с $k + 1$ НЭ, работающими

одновременно, к эквивалентной линейной цепи (мы называем ее коммутационным эквивалентом /КЭ/), анализ которой оказывается простым [4].

в) 0 возможности рекуррентного анализа всех режимов и схем. В вентильных устройствах обычно изучают каждый режим в отдельности и, как правило, по каждой схеме [5-7], что очень объемно. Применение метода КЭ позволяет в рекуррентной форме исследовать всю совокупность схем и режимов, примерно в $m k_x$ раз снижая трудоемкость и объем [4, 9, 10, 14] .

г) 0 числе анализируемых структур. При двухлинейных авх за период анализируют обычно две разные структуры, припасовывая решения в моменты смены структур с тем, чтобы найти эти моменты (например, начало открытия вентиля ψ , угол коммутации γ , длительность открытого состояния вентиля Λ и пр.), а также начальные условия или постоянные интегрирования, обусловленные начальными зарядами в реактивных элементах.

Мы покажем далее, что в силу свойственной методу КЭ рекуррентности можно ограничиться анализом лишь одной структуры, а именно, для k -го подинтервала коммутации. Для k^- -го подинтервала, смежного внутри периода с k -м, достаточно в полученных соотношениях заменить k на k^- , что при прочих равных условиях примерно в два раза снижает выкладки и объем.

д) 0 числе искомым неизвестных. Так как структуры схем, соответствующие отдельным отрезкам линеаризированных авх, являются линейными, их анализ осуществим любыми методами линейной теории. В этом заключено одно из важнейших достоинств методики припасовывания, широко применяемой в

в анализе нелинейных устройств. Однако поиск в общем случае i_x переменных линейной цепи ξ_x -го порядка (зависящего от числа реактивных элементов) требует по известной методике определения $i_x \xi_x$ неизвестных, что в нашем случае неприемлемо.

Более рационален прием [3,4,1] , связанный с поиском прежде всего некоторой переменной, называемой исходной [4,II] через которую остальные переменные находятся уже без операций интегрирования. В качестве исходной целесообразно выбирать риджитную переменную, например ток индуктивности или напряжение емкости. В этом случае при типовых воздействиях (у нас - при типовых эдс) решение линейной цепи сводится к поиску лишь ξ_x корней [II] . Но применительно к схемам класса $\xi k m \ell R I I C$ здесь обнаруживается дальнейшее упрощение. Оказывается, что хотя структура этих схем в k -м подинтервале содержит $k+2$ реактивных элементов, при принятых условиях возможен очень простой прием, изложенный далее, приводящий к решению уравнения всего лишь первого порядка.

е) 0 начальных условиях. Начальные условия, обусловленные начальными зарядами в L и C элементах, находят в кусочных задачах из стыковки решений, полученных за период для разных структур.

Для $k+1$ вентильных структур, подобных рис. I, одно- или многозвенный фильтр которых начинается с конденсатора в поперечной ветви, начальное напряжение $u_{C(k)}(0)$ в любом k -м режиме можно легко найти независимо от характера внутренних сопротивлений из простых физических соображений, не прибегая к указанной, обычной для нелинейных цепей процедуре. Действительно, из рис. Iб видно, что $u_{C(k)}(0)$ равно значению эдс $\xi_{u(k)}(0)$ в ветви с открывающимися вентиль-

лем. Это дополнительно упрощает решение.

Более того оказывается, и мы покажем это, что решение задачи возможно без предварительного поиска начальных зарядов в $k+1$ внутренних индуктивностях, что также намного упрощает анализ, снижая трудоемкость.

ж) 0 числе периодов. Для изучения параметрической динамики процессов достаточно рассмотреть лишь стационарные режимы. Нередко такие состояния в схемах с индуктивной или на противо-эдс нагрузкой анализируют в общем виде для n периодов [12,13], что ведет к излишнему усложнению.

В силу периодичности стационарных процессов достаточно рассмотреть лишь один период и тем самым получить более простые выражения.

з) Об отсчете эдс и симметрии ветвей. Отсчет эдс \mathcal{E}_μ с амплитудами $\mathcal{E}_{a\mu}$ и фазами ψ_μ удобно вести справа налево на временной диаграмме. Тогда при соблюдении полной симметрии ветвей - фазово-амплитудной симметрии эдс и равенстве индуктивностей - имеем при $\mu^\pm = \mu \pm 1, \mu = 1, 2, \dots, m$

$$\mathcal{E}_{a\mu} = \mathcal{E}_a, \quad S_{a\mu} = S_a, \quad \psi_\mu = 2\mu\theta, \quad l_\mu = l. \quad (1)$$

В этом случае огибающая фазных эдс изменяется периодически с полупериодом $\theta = \pi/m$, а длительность подинтервалов k и k^- равна 2θ . Поэтому достаточно найти лишь угол γ_k (при $k=0$ - угол Λ) с тем, чтобы однозначно вычислить γ_{k^-} как $2\theta - \gamma_k$, а Λ_k как $2k\theta + \gamma_k$. Все это упрощает выкладки и соотношения.

Перечисленный комплекс приемов, отличающихся практической полезностью, удобством и простотой, позволяет предельно минимизировать затраты труда и объем изложения на всех этапах исследования вентиляльных схем от анализа до машинного проектирования. Убедимся в этом на примере анализа схем рассматриваемого класса.

3. Расчет переменных и критические состояния схем класса $\mathcal{E}(S) \in R \cap C_\infty$. Определив по теореме Эйлера-Листинга число независимых контуров в схеме рис. 1б, находим, что в k -м подинтервале коммутации структура схем класса $\mathcal{E} \in R \cap C_\infty$ описывается системой из $k+1$ дифференциальных уравнений вида

$$\mathcal{E}_\mu(k) - i'_\mu(k) - U_C(k) = 0, \quad (\mu=1, 2, \dots, k; k=0, 1, \dots, k_x) \quad (2)$$

или при условии $U_C(k) = U_0(k)$, принятом выше,

$$i'_\mu(k) = \mathcal{E}_\mu(k) - U_0(k). \quad (3)$$

В связи с наличием индуктивностей ток i_μ является риджитной переменной, для которой справедлив закон

$$R_{rig} (0)_0 = 0, \quad (4)$$

где индекс 0 соответствует нулевым начальным условиям.

До момента замыкания ключей K_μ индуктивности \mathcal{L}_μ отключены от нагрузки, и начального заряда в них нет. Следовательно, согласно (4)

$$i_\mu(k) (-2\mu^{-\theta}) = 0. \quad (5)$$

Так как $\int_a^b y' d\vartheta = y(a) - y(b)$

или при $y(\vartheta) = 0$

$$y(a) = \int_a^{\vartheta} y' d\vartheta, \quad (5')$$

то с учетом (5) и (3) из (5') получаем

$$i_{\mu(\kappa)} = \int_{-2\mu^{-\theta}}^{\vartheta} i'_{\mu(\kappa)} d\vartheta = \int_{-2\mu^{-\theta}}^{\vartheta} (\mathcal{E}_{\mu(\kappa)} - U_{0(\kappa)}) d\vartheta. \quad (6)$$

При

$$\mathcal{E}_{\mu(\kappa)} = \mathcal{S}_{\mu(\kappa)} = \sin(\vartheta + \psi_{\kappa} + 2\mu^{-\theta}) \quad (7)$$

это дает

$$i_{\mu(\kappa)}(\vartheta) = \cos \psi_{\kappa} - \cos(\vartheta + \psi_{\kappa} + 2\mu^{-\theta}) - \\ - (\vartheta + 2\mu^{-\theta}) U_{0(\kappa)}, \quad (8)$$

где $\kappa = 0, 1, \dots, \kappa_x$; $\mu = 1, 2, \dots, \kappa^+$.

Отсюда начальные токи в μ -х ($\mu = 1, 2, \dots, \kappa^+$) индуктивностях равны

$$i_{\mu(\kappa)}(0) = 2 [\sin \mu^{-\theta} \sin(\psi_{\kappa} + \mu^{-\theta}) - \mu^{-\theta} U_{0(\kappa)}], \quad (9)$$

а начальное напряжение на емкости

$$U_{0(\kappa)} = \sin \psi_{\kappa} \quad (10)$$

находится из упомянутого выше условия $S_{1(\kappa)}(0) = U_{c(\kappa)} = U_{0(\kappa)}$.

Итак, мы довольно просто получили компактные, благодаря рекуррентности, и, вместе с тем, общие соотношения, пригодные для расчета любого μ -го тока m -фазных схем с ℓ_μ и R/C фильтром, работающих в любом k -м под-интервале коммутации. Наряду с простотой и значительной информативностью соотношений важным является тот факт, что окончательные выражения для токов выведены без предварительного поиска начальных условий в $k+2$ перезаряжаемых одновременно реактивных элементах, как, напротив, следовало бы поступить при традиционном применении классической теории по решению дифференциальных уравнений.

Теперь остальные переменные, производные от исходной, находятся просто, поскольку не связаны с интегрированием [11],

$$u_{\ell\mu(k)}(\vartheta) = i'_{\mu(k)}(\vartheta) = \mathcal{E}_{\mu(k)}(\vartheta) - U_{0(k)} = S_{\mu(k)}(\vartheta) - U_{0(k)}, \quad (11)$$

$$i_{H(k)}(\vartheta) = \sum_{\mu=1}^{k^+} i_{\mu(k)}(\vartheta) = \sum_{\mu=1}^{k^+} \int_{-2\mu\theta}^{\vartheta} (\mathcal{E}_{\mu(k)} - U_{0(k)}) d\vartheta = (12)$$

$$= k^+ \cos \psi_k - S_a^{(k)} \cos(\vartheta + \psi_k + k\theta) - (k^+ \vartheta + 2k\theta) U_{0(k)};$$

$$S_a^{(k)} = \sin k^+ \theta / \sin \theta,$$

$$i_{C(k)}(\vartheta) = i_{H(k)}(\vartheta) - I_{0(k)} = i_{H(k)}(\vartheta) - g_R \sin \psi_k, \quad (13)$$

$$u_{C(k)}(\vartheta) = U_{C(k)} = \sin \psi_k. \quad (14)$$

Соотношения (II-14) даны как для произвольных, так и синусоидальных эдс.

С целью получения окончательной информации о k -м режиме, то есть для соотношений k^- -го подинтервала коммутации, достаточно в приведенных выражениях заменить k на k^- (при $k > 0$).

На этом задачу анализа можно считать законченной. Необходимые для проектирования схем режимные показатели находим известными способами на основе полученных выражений.

Например, среднее значение тока полезной нагрузки равно

$$I_{o(k)} = \frac{1}{2\theta} \left[\int_0^{\gamma_k} i_{H(k)}(\vartheta) + \int_{\gamma_k}^{2\theta} i_{H(k-)}(\vartheta) \right] d\vartheta =$$

$$= \frac{1}{2\theta} \left[\sum_{\mu=1}^{k^+} \int_0^{\gamma_k} \int_{-2\mu\theta}^{\vartheta} + \sum_{\mu=1}^k \int_{\gamma_k}^{2\theta} \int_{-2\mu\theta}^{\vartheta} \right] (\xi_{\mu(k)} - U_{o(k)}) d\vartheta d\vartheta,$$

или при $\xi_{\mu} = S_{\mu}$, $\gamma_k = \gamma_k / 2$ после преобразований имеем

$$I_{o(k)} = \frac{\sin^2(\gamma_k + k\theta)}{\sin \psi_k} - \left[(3k-2)\theta^2 + (2\theta + \gamma_k)\gamma_k \right] U_{o(k)}. \quad (15)$$

Иначе

$$I_{o(k)} = g_R \sin \psi_k. \quad (16)$$

Приведенные или зависящие от них величины являются функциями моментов переключения вентилей ψ_k и γ_k . Уравнения связи этих моментов с определяющим параметром g_R

находим следующим образом. По условию $i_{k+(k)}(\gamma_k) = 0$ при $k = 0, 1, \dots, k_x$ из (8) получаем

$$\sin(\gamma_k + k\theta) \sin(\gamma_k + k\theta + \psi_k) = (\gamma_k + k\theta) \sin \psi_k \quad (17)$$

или

$$\operatorname{ctg} \psi_k = (\gamma_k + k\theta) / \sin^2(\gamma_k + k\theta) - \operatorname{ctg}(\gamma_k + k\theta). \quad (18)$$

В частности, при $k = 0$ (18) дает выражение для угла

$$\gamma_0 = \lambda_0, \text{ полученное в [1] для режима } P = 3.$$

При $k > 0$ угол $\lambda_k = 2k\theta + \gamma_k$, и принципиально важная закономерность $\lambda_k > \lambda_{3c}$ (λ_{3c} - время заряда ёмкости), выявленная в [3, 9, 4, 1] для других классов схем с емкостью, здесь тем более проявляется, поскольку емкость за время λ_k перезаряжается $2k + 1$ раз.

Уравнение (18) содержит два неизвестных. Другое уравнение находим из (15, 16)

$$\theta g_R = \left(\frac{\sin(\gamma_k + k\theta)}{\sin \psi_k} \right)^2 - (3k-2)\theta^2 - (2\theta + \gamma_k)\gamma_k. \quad (19)$$

Заменяя в (19) $\sin \psi_k$ из (18) и обозначая $\beta_k = \gamma_k + k\theta$, приходим к замкнутому относительно γ_k уравнению лишь с одним неизвестным

$$\theta g_R - 1 = \left(\frac{\beta_k}{\sin \beta_k} \right)^2 - \frac{2\beta_k}{\operatorname{tg} \beta_k} - \theta^2 - (2\theta - \gamma_k)\gamma_k. \quad (20)$$

Решая (20) в числах (на ЭВМ) и подставляя результаты в (18,16) и другие соотношений, получаем массивы табулированных значений ψ_k , γ_k , I_0 и пр. в зависимости **только** от одного обобщенного параметра g_R . Построенные при этом номограммы существенно снижают трудоемкость проектировщика.

Нам остается определить критические параметры схемных элементов, соответствующие переходу схем из одного коммутационного режима в другой [2,4,10,14,1]. По условию $\gamma_k = \gamma_{кр}(k) = \theta$ из (20) получаем

$$\theta g_{R \text{ кр}(k)} - 1 = (k^+ \theta / \sin k^+ \theta)^2 - 2k^+ \theta \operatorname{ctg} k^+ \theta - 3k\theta^2. \quad (21)$$

Видно, что $g_{R \text{ кр}(k)}^{(m)} = f(m, k)$.

Алгоритм оценки типа режима прост

$$g_{R(k)} \leq g_{R \text{ кр}(k)} \rightarrow P \subset K_k$$

$$g_{R(k)} > g_{R \text{ кр}(k)} \rightarrow P \subset K_{k^+}.$$

Итак, мы полностью выяснили параметрическую динамику физических состояний схем с емкостным фильтром при любом числе внутренних ветвей, содержащих источники эдс, индуктивности и вентили, при изменении индуктивностей от 0 до ∞ и нагрузки в предельно возможном диапазоне - от холостого хода до короткого замыкания. Упрощенная блок-схема машинной программы дана ниже.

4. Выводы. 1) В статье изложен комплекс методических приемов, отличающихся практической полезностью, эффективностью и простотой при исследовании многовентильных структур различных классов.

2) На примере схем класса $\mathcal{E}(S)km\ell R||C_\infty$ показано, что применение интерметодического способа позволяет существенно снизить трудоемкость исследователя и объем изложения при изучении параметрических состояний многовентильных структур с толерансными параметрами.

3) Согласно [2-4] показано, что, в отличие от пространенных представлений, многовентильные схемы с емкостным фильтром работают не только в режимах прерывистого выходного тока, но также в коммутационных k -го порядка режимах. Тем самым выявлены новые физические состояния рассмотренных схем.

4) Получены простые и вместе с тем общие соотношения, в рекуррентном виде охватывающие все физические состояния схем класса $\mathcal{E}(S)km\ell R||C_\infty$ ($k=0,1,\dots,k_x; m=1,2,\dots,m_x$), возможные при любых (от 0 до ∞) значениях обобщенной постоянной времени $g_R = \omega\ell/R$.

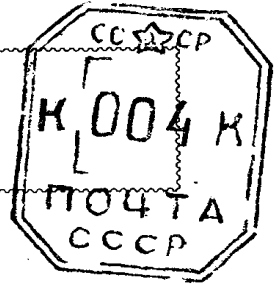
5) Установлено, что, в отличие от традиционных предположений, длительность заряда (разряда) емкости, перезаряжающейся за $\Lambda_k 2k+1$ раз, всегда меньше (больше) длительности открытого Λ_k (закрытого) ^{Λ_k} состояния вентилей, что открывает новые, принципиально важные возможности по выявлению и трактовке физической сущности процессов в схемах с емкостным накопителем.

6) Для схем класса $\mathcal{E}km\ell R||C_\infty$ впервые в аналитическом виде получены расчетные соотношения критических параметров, позволяющие в инженерной практике намного удобнее, чем экспериментально, определять тип режима, в котором работают реальные или могут оказаться проектируемые устройства при данных m и g_R .

7) С целью существенного облегчения расчетов дана блок-программа машинных решений на ЭВМ. Ее применение позволяет освободить исследователя и разработчика от выполнения трудоемких вычислительных операций, особенно при поверочных или циклических (по методу проб) расчетах.



220027 МИНСК 27
ЛЕНИНСКИЙ ПР. 65
БЕЛОРУССКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ



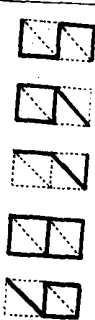
Куда Москва, Д-423
ул. Народного ополчения 32
ВЗФ ИС кар. Электрохимии
Кому Решиву А. И.

Индекс предприятия связи и адрес
отправителя
РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА
ИЗВЕСТИЯ
"ЭНЕРГЕТИКА"
СССР СССР
г. Минск, 27, Ленинский пр., 65, БТИ
Индекс предприятия связи места назначения

Почта отвечает
за принятые отправления
в течение 6 месяцев со дня



Цена 1 коп. за 2 шт.



Индекс отправления

Литература

1. Репин А.М. Исследование неуправляемых и управляемых схем классов $S_m \ell R_{II} C_{\infty}$ и $S_{\alpha m} \ell R_{II} C_{\infty}$ в режиме $P \in \mathcal{Z}$. Изв. ВУЗов, "Энергетика", 1977, № 12.
2. Репин А.М. Критические состояния многовентильных схем различных классов. Материалы нтк ВЗЭС, М., 1970.
3. Лавриченко И.Л., Репин А.М., Собинов К.П. Анализ переходных процессов устройства "источник питания - накопитель - нагрузка". Материалы нтк МЭС, М., 1967.
4. Репин А.М. Исследование параметрических состояний m -фазных преобразователей малой мощности. Авто реф. дисс., ВЗЭС, М., 1971.
5. Емельянов В.И. Трёхфазная мостовая схема. Изв. НИИПТ., Л., 1961.
6. Размадзе Ш.М. Преобразовательные схемы и системы. Изд. "Вышая школа", М., 1967.
7. Бенделиани Н.Д. Анализ электромагнитных процессов в 24-фазной одноконтурной вентильной схеме. Авто реф. дисс., ГПИ, Тб, 1969.
8. Папалекси Н.Д. О процессах в цепи переменного тока, содержащей электрический вентиль. *Annal. der Physio*, t. 39, 1912, № 15.
9. Белопольский И.И., Репин А.М. О некоторых особенностях работы многовентильных схем при учёте внутренних сопротивлений. МДНТП, 1969.
10. Репин А.М. Выпрямители для РЭА, построенной на микро-схемах. МДНТП, М., 1973.
11. Репин А.М. Формула разложения для произведения изображений и её применение в анализе линейных систем. Изв. АН СССР, "Энергетика и транспорт", 1973, № 5.

12. Takeuchi T. I., Maeda A., Method of Φ - function to analyse poly-phase half-wave rectifier circuit having SCR in secondary circuit of transformer. JIEEJ, V. 85, 1965, № 918.

13. Здрок А.Г., Салютин А.А. Выпрямительные устройства электропитания и управления. Изд. "Энергия", М., 1975.

14. Белополюсский И.И., Репин А.М., Христианов А.С. Стабилизаторы низких и средних напряжений. Изд. "Энергия", М., 1974.

ИНФОРМАЦИОННО-ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА
 ИМ. Н. П. БАХАРЕВА

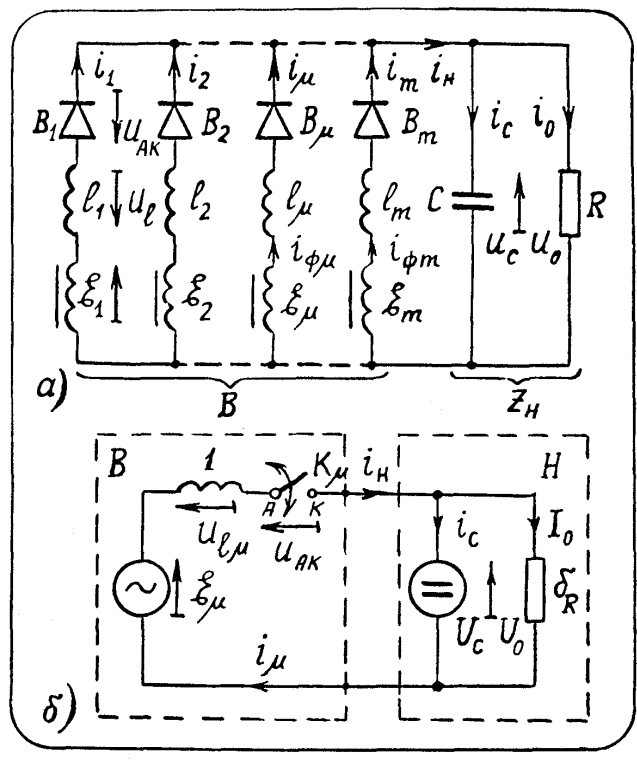


Рис. 1.

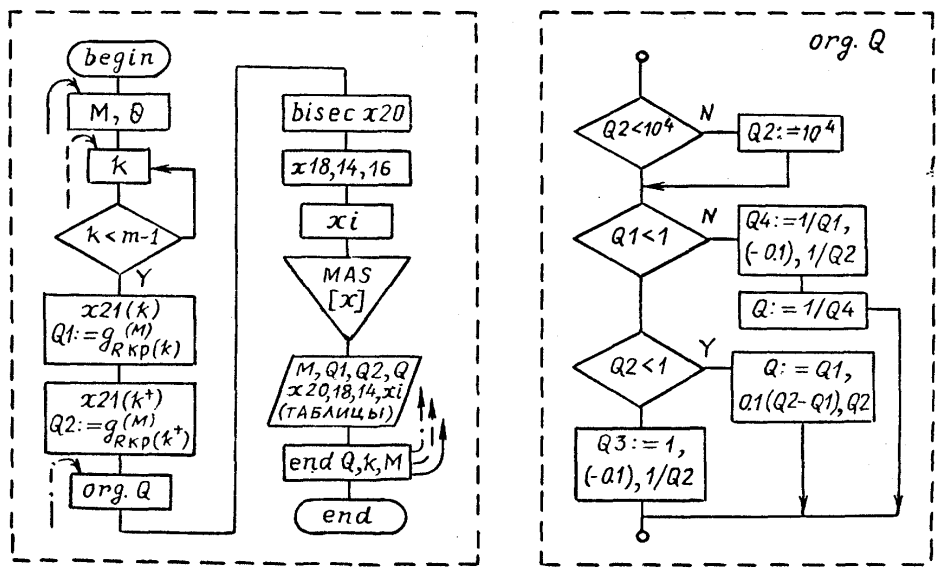


Рис.2. Блок-схема программы

Литература

1. **Репин А.М.** Исследование неуправляемых и управляемых схем классов $SmlR//C_\infty$ и $S\alpha mlR//C_\infty$ в режиме $P \subset 3$ // Изв. ВУЗов, "Энергетика". 1977.
2. **Репин Л.М.** Критические состояния многовентильных схем различных классов // Материалы НТК ВЗЭС. - М.: ВЗЭС. 1970.
3. **Лавриченко И.Л., Репин А.М., Собинов К.П.** Анализ переходных процессов устройства "источник питания – накопитель – нагрузка" // Материалы НТК МЭС. - М.: МЭС. 1967.
4. **Репин А.М.** Исследование параметрических состояний m -фазных преобразователей малой мощности // Кандидатская диссертация. – М., МЭС. 1971. Автореф. дисс. - М.: ВЗЭС. 1971.
5. **Емельянов В.И.** Трёхфазная мостовая схема // Изв. НИИПТ. - Л., 1961. –
6. **Размадзе Ш.М.** Преобразовательные схемы и системы. - М.: Изд. "Высшая школа". 1967.
7. **Бенделиани Н.Д.** Анализ электромагнитных процессов в 24-фазной одноконтурной вентильной схеме // Автореф. дисс. Тб.: ГПИ. 1969.
8. **Папалекси Н.Д.** О процессах в цепи переменного тока, содержащей электрический вентиль // Annal. der Physik. Bd. 39. 1912. № 15.
9. **Белопольский И.И., Репин А.М.** О некоторых особенностях работы многовентильных схем при учёте внутренних сопротивлений. – М.: МДНТП. 1969.
10. **Репин А.М.** Выпрямители для РЭА, построенной на микросхемах. – М.: МДНТП. 1973.
11. **Репин А.М.** Формулы разложения для произведения изображений и их применение в анализе линейных систем // Изв. АН СССР, "Энергетика и транспорт". 1973. № 5.
12. **Takeuchi T.I., Maeda A.** Method of Φ -function to analyse polyphase half-wave rectifier circuit having SCR in secondary circuit of transformer // IEE Jp. Vol. 85. 1965. № 918.
13. **Здрок А.Г., Салютин А.А.** Выпрямительные устройства электропитания и управления. – М.: Изд. "Энергия". 1975.
14. **Белопольский И.И., Репин А.М., Христианов А.С.** Стабилизаторы низких и милливольтовых напряжений. – М.: Изд. "Энергия". 1974.

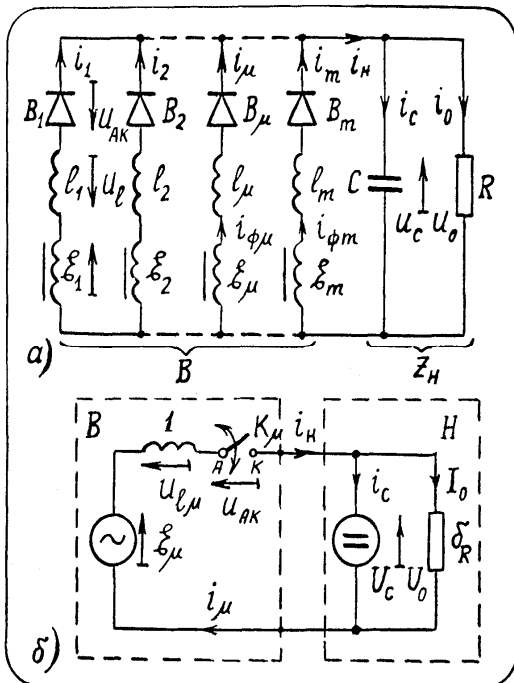


Рис.1. Эквивалентная схема или схемная модель класса $EktlR//C$ (а) m -фазного конвертера с l_μ и $R//C$ -фильтром и её относительный ключевой эквивалент (б) при $C \rightarrow \infty$ в выпрямительном режиме

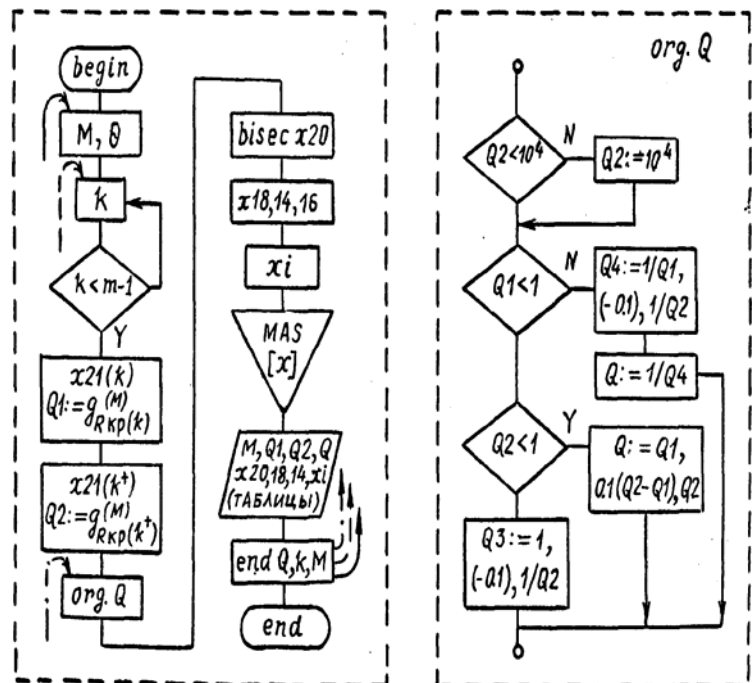


Рис.2. Блок-схема программы расчётов на ЭВМ (цифры при искомым x – номера формул в тексте, ромбы – блоки сравнения, треугольник – массив данных, трапеция – вывод на печать, остальное – ввод данных и расчёты)