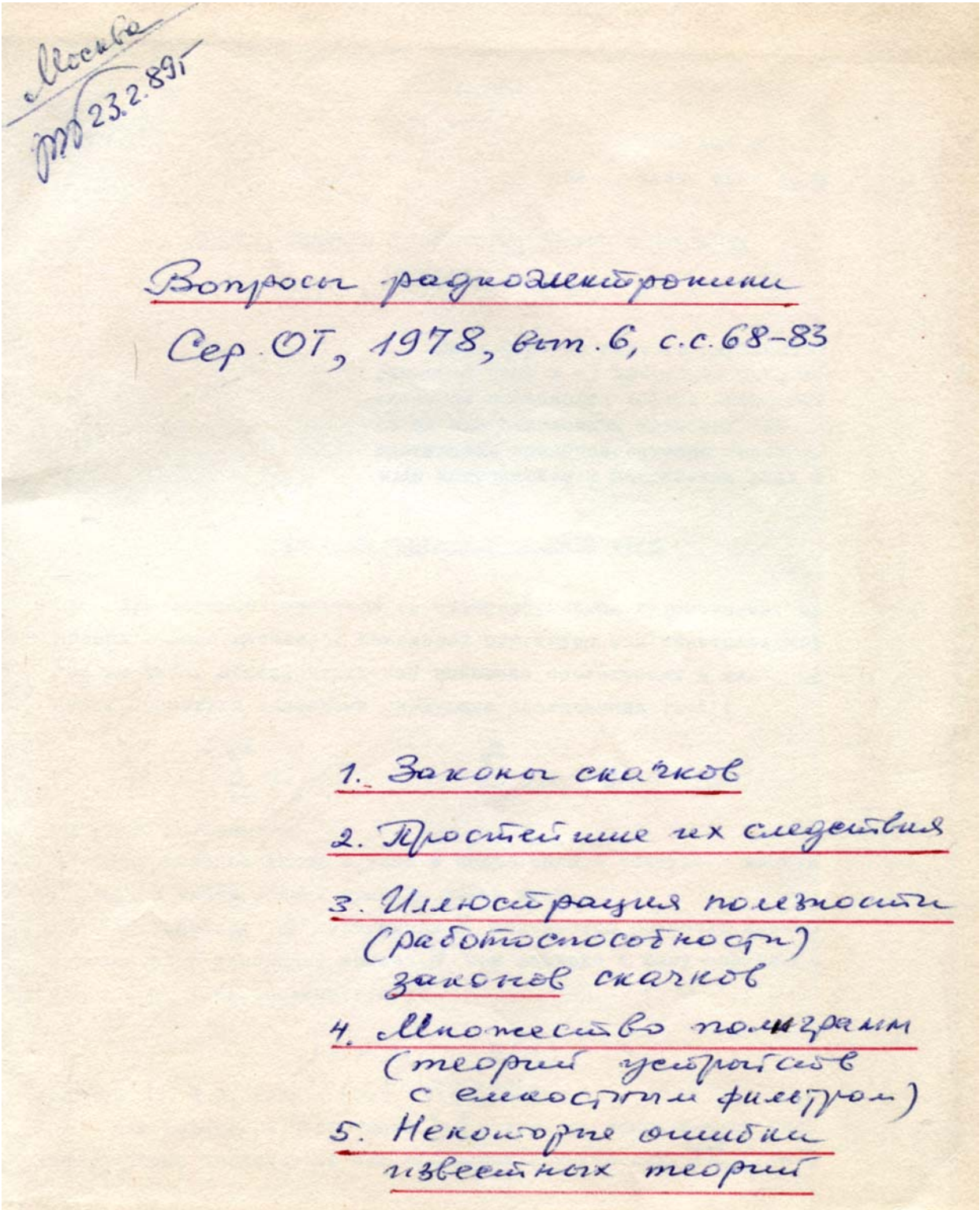


$\Sigma 1 = 0$ **Repin Arkadiy M. Laws of jumps. / А. М. Репин. Законы скачков**

Цикл публикаций.

С выражением благодарности (gratitude) **В. Н. Аксёнову** (д.т.н., проф., зав. каф. электропитания устройств связи ВЗЭС Минсвязи), **И. И. Белопольскому** (к.т.н., нач. ведущего в подотрасли отд. по источникам электропитания, НИИДАР /дальней радиосвязи), **Э. Л. Блоху** (д.т.н., проф., зав. кафедрой математики МЭС, сотруднику Института проблем передачи информации (ИППИ) АН СССР), **Ф. Ф. Волкову** (д.т.н., главному конструктору БРЛС, НИИР (радиостроения) МинРадиопрома), **С. М. Герасимову** (инженер-полковнику, проф., нач. каф. радиоприёмно-передающих устройств (РПМПУ) КВИАВУ, лауреату Ленинской премии), **Л. А. Жекулину** (д.т.н., проф., зав. каф. ТОЭ МЭС, зав. отд. Института радиоэлектроники (ИРЭ) АН), госпоже **Элизабет А. Зинсер** (очаровательной незнакомке, Президенту Московского университета штата Айдахо, США, и проф. **Клэнси Потрацу /Elisabeth A. Zinser (President)**, and **Clancy Potratz** (Professor of Department of Mathematics and Statistics, Moscow University, Idaho, USA), **В. М. Лаврову** (проф., "энциклопедии" кафедры ТОЭ МЭС, Минсвязи СССР), **А. Ф. Макуренкову** (к.т.н., доц., глав. констр. БРЛС, зам. глав. ред. н.-т. сб. "Вопросы радиоэлектроники" (ВРЭ), Сер. ОТ и Сер. ОВР, зам. дир. по науке НИИ Радиостроения), **М. Э. Ключелю** (к.т.н., с.н.с., непредвзятый рецензент из НИИР).



ФОРМУЛЫ СКАЧКОВ И НЕКОТОРЫЕ ТЕОРИИ ВЕНТИЛЬНЫХ
СТРУКТУР

Даны формулы скачков переменных электрической цепи и их некоторые следствия. Практическая полезность формул проиллюстрирована на многочисленных примерах из области вентильных преобразователей энергии. Выявлены достоинства и недостатки ряда теорий.

Формулы скачков и их следствия

При изучении объектов со скачкообразными переменными, представляемых в виде некоторой связанной структуры или электрической цепи, при анализе, исследовании или описании протекающих в них процессов могут оказаться полезными следующие соотношения [1-3]:

$$\sum_{j=1}^{j_x} \downarrow i_j = 0; \quad \sum_{\nu=1}^{\nu_x} \downarrow u_{\nu} = 0, \quad (1)$$

согласно которым:

сумма скачков токов в узле и напряжений в контуре электрической цепи в любой момент времени равна нулю.

Под скачком $\downarrow R$ переменной R понимается разность значений этой переменной в некоторый момент ϑ при подходе к нему справа (ϑ_+) и слева (ϑ_-) на временной оси:

$$\downarrow R = R(\vartheta_+) - R(\vartheta_-), \quad (2)$$

причём $\downarrow R \geq 0$, если $R(\vartheta_+) - R(\vartheta_-) \geq 0$.

Для риджитных переменных [4], т.е. не изменяющихся скачком при любой форме воздействий или при любых коммутациях, $\downarrow R_{rig} = 0$.

Из (1) вытекает ряд следствий, очевидные из которых следующие.

1. Если один из токов узла (одно из напряжений контура) электрической цепи претерпевает в данный момент скачок, то хотя бы ещё один ток того же узла (одно напряжение того же контура) одновременно претерпевает скачок.

2. Если из общего числа j_x токов узла (из v_x напряжений контура) электрической цепи в данный момент не претерпевают скачок $j_x - 1$ токов ($v_x - 1$ напряжений), то ни один из токов того же узла (ни одно напряжение того же контура) скачком в этот момент не изменяется.

3. Если в ветви, принадлежащей разветвлённым узлам цепи, ток претерпевает скачок, то хотя бы в ещё по одной ветви этих узлов токи одновременно претерпевают скачок.

4. Если в одной из ветвей цепи ток претерпевает скачок, то в цепи найдётся хотя бы один контур, во всех ветвях которого токи одновременно претерпевают скачок.

5. Если на элементе (ветви) цепи, принадлежащем (-ей) нескольким контурам, напряжение претерпевает скачок, то хотя бы ещё на одном из элементов (одной из ветвей) каждого контура напряжение претерпевает скачок.

6. Если цепь содержит v_x ветвей и y_x узлов, то

$$\sum_{\nu=1}^{v_x} 1_{\nu y} |i_{\nu}| = 0, \quad y = 1, 2, \dots, y_x, \quad (3)$$

где $1_{\nu y}$ - некоторая матричная единица:

$$1_{\nu y} = \begin{cases} +1 & \text{при } |i_{\nu}| > 0 \\ -1 & \text{при } |i_{\nu}| < 0 \\ 0 & \text{при } \nu \notin y \end{cases} \quad \text{при } \nu \in y. \quad (4)$$

$1_{\nu y}$ представляет собой нулевые и единичные элементы матрицы, определяя знак и значение скачка в зависимости от связи индексов ν и y . Символы $\nu \in y$ и $\nu \notin y$ означают принадлежит или не принадлежит ν -я ветвь y -му узлу.

7. Если цепь содержит v_x ветвей и k_x контуров, то

$$\sum_{\nu=1}^{v_x} 1_{\nu k} |u_{\nu}| = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } k = 1, 2, \dots, k_x; \quad 1_{\nu k} = \begin{cases} +1 & \text{при } |u_{\nu}| > 0 \\ -1 & \text{при } |u_{\nu}| < 0 \\ 0 & \text{при } \nu \notin k \end{cases} \quad \text{при } \nu \in k. \quad (6)$$

Причем в (3) и (5) из y_x и k_x уравнений по крайней мере $j_n = y_x^- = y_x - i$ и $y_n = \varphi_x - y_x^-$ независимые.

Здесь уместны следующие три замечания.

1. Если не учитывать случаи со скачкообразно изменяющимися токами в индуктивностях и напряжениями на емкостях, т.е. так называемые особые или некорректные случаи, и рассматривать наиболее распространенные цепи, в которых эти токи и напряжения являются риджитными переменными, то из указанных сумм исключаются:

- токи в ветвях с индуктивностями и в зашунтированных емкостями резистивных ветвях,

- напряжения на элементах, дуальных токовым, а именно, емкостных и последовательно соединенных с индуктивностями резистивных элементах.

2. При трактовке формул скачков и их следствий не участвуют конститутивные соотношения типа закона Ома, закона между зарядом и напряжением на емкости и пр. Так что приведенные результаты применимы ко всем электрическим цепям: линейным, нелинейным, планарным, непланарным, зависящим от времени, неизменным, пассивным, активным, одномерным, многомерным. Воздействия (эда, сигналы) могут быть произвольными - синусоидальными, несинусоидальными, периодическими, непериодическими, детерминированными, случайными. Начальные условия также произвольны. Изучаемые режимы - любые: переходные, установившиеся, временные, параметрические.

3. Если воспользоваться более абстрактной терминологией, введенной рядом зарубежных авторов (например, *Shannon, Koenig, Nagelbarger* и др.), и представить изучаемый объект в виде некоторой топологически связанной структуры с "продольными" и "поперечными" переменными (адекватными токам и напряжениям), то законы (1) можно сформулировать в более общем виде:

сумма скачков продольных (в узле) или поперечных (в контуре) переменных топологической структуры в любой момент времени равна нулю.

Формулировки вытекающих отсюда следствий аналогичны предыдущим.

Некоторые теории вентильных структур с ёмкостными фильтрами

Проиллюстрируем практическую полезность формул (1) и их следствий на примере ряда теорий, разработанных для вентильных структур с ёмкостными фильтрами.

К таким структурам относится большое разнообразие схем и устройств, используемых в самых различных областях техники: многочисленные классы управляемых и неуправляемых механических, электронных и полупроводниковых преобразователей энергии (сигналов), различного типа амплитудные детекторы, вентильные преобразователи средних и эффективных значений, квазипиковые детекторы различной измерительной аппаратуры, в частности, измерителей и подавителей радиопомех, устройства стабилизации амплитуд колебания RC -генераторов, многовентильные устройства автоматического управления реверсивных агрегатов электропривода, лучевые схемы преобразователей электромагнитных сепараторов, используемых на современных обогатительных фабриках при регенерации магнетитовой суспензии, устройства стабилизации излучения твёрдотельных оптических квантовых генераторов непрерывного действия и многие другие практические реализации вентильных структур с ёмкостными накопителями.

Достоинства теорий подобных устройств известны. Однако недостатки их в литературе практически не освещены, что затрудняет обоснованное решение вопроса, какой из них отдать предпочтение.

В связи с этим крайне важно выявить основные минусы, присущие известным теориям, детальный анализ которых при их многообразии требует, однако, большого объёма. Здесь возможны разные приёмы. При ограниченных рамках статьи указанная цель наиболее просто достижима путём обращения к формулам (1) при обязательной иллюстрации сущности теорий в компактном и в то же время наглядном виде.

Из существующего множества классов вентильных схем с ёмкостью на выходе ограничимся рассмотрением схем без потерь при синусоидальных (S) входных воздействиях (эдс, сигналах). Применительно к этому случаю на рис. 1 показаны взятые из литературы копии форм переменных, отражающих сущность соответствующих им теорий при различном числе m входных эдс. Схема замещения таких устройств приведена на

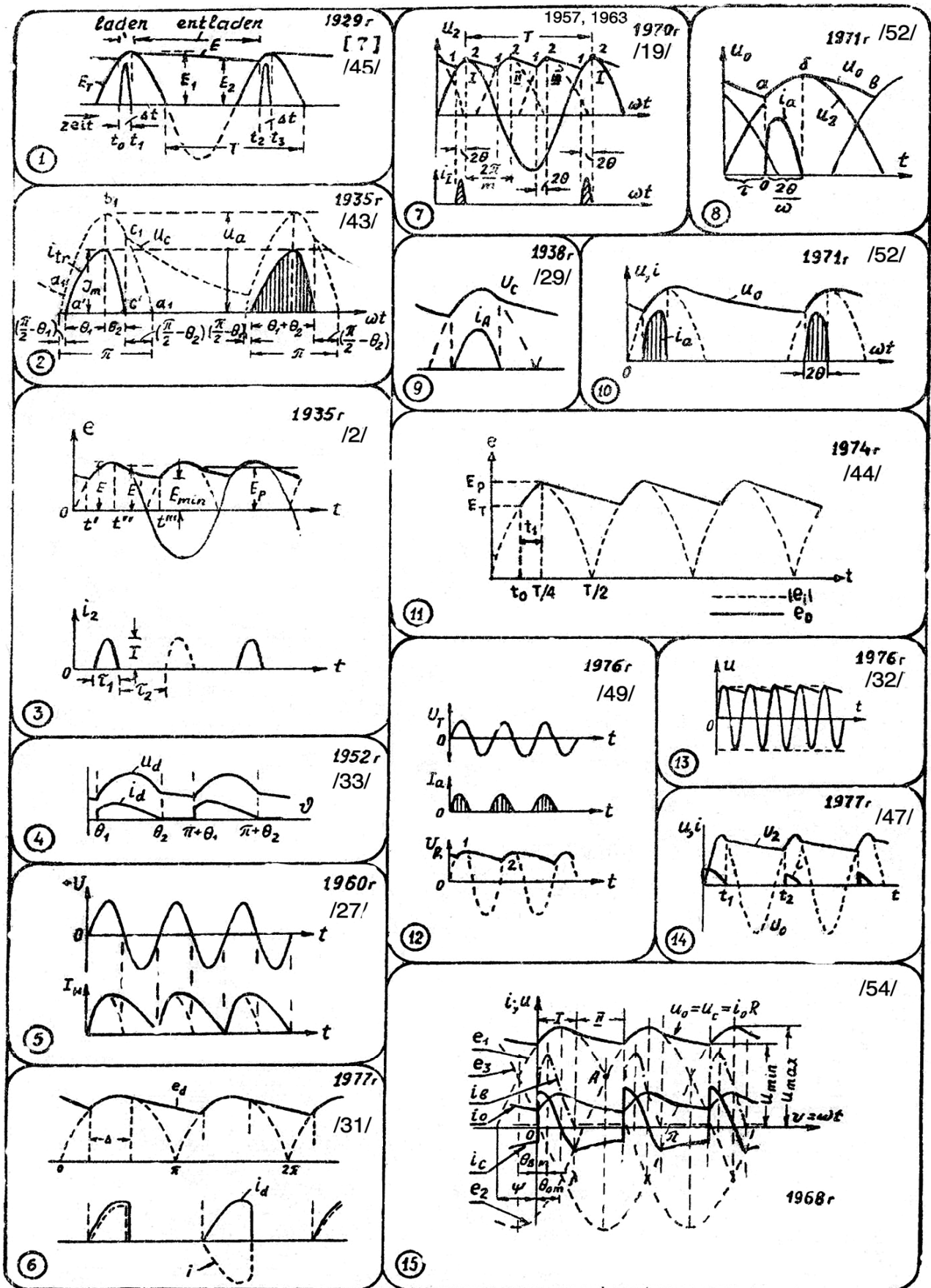


Рис.1. Формы переменных в вентильных схемах класса *SmRиC*, опубликованные в литературе (см. также с. 73)

На с. 73: Рис.1. Окончание

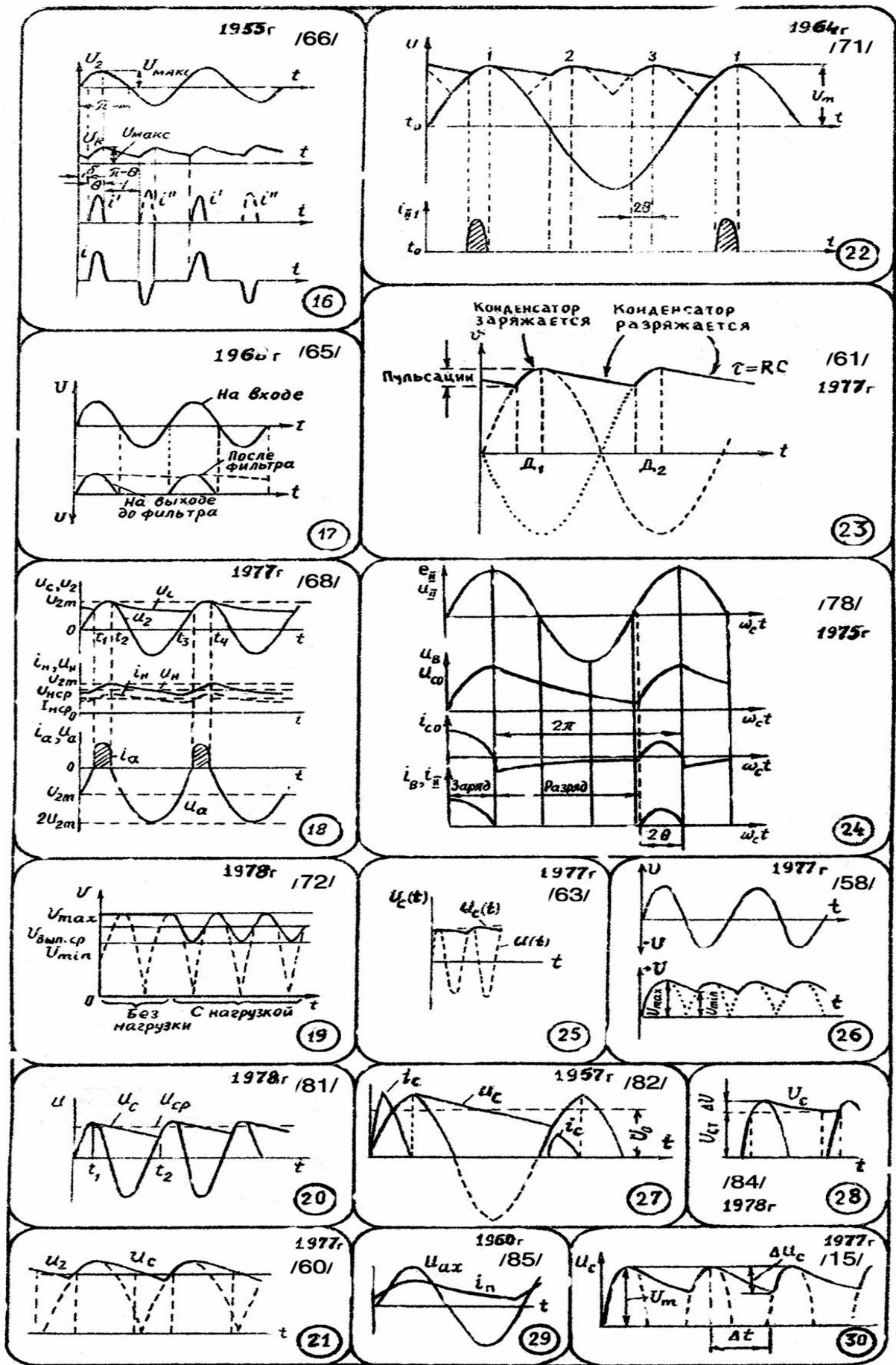


Рис. I. окончание

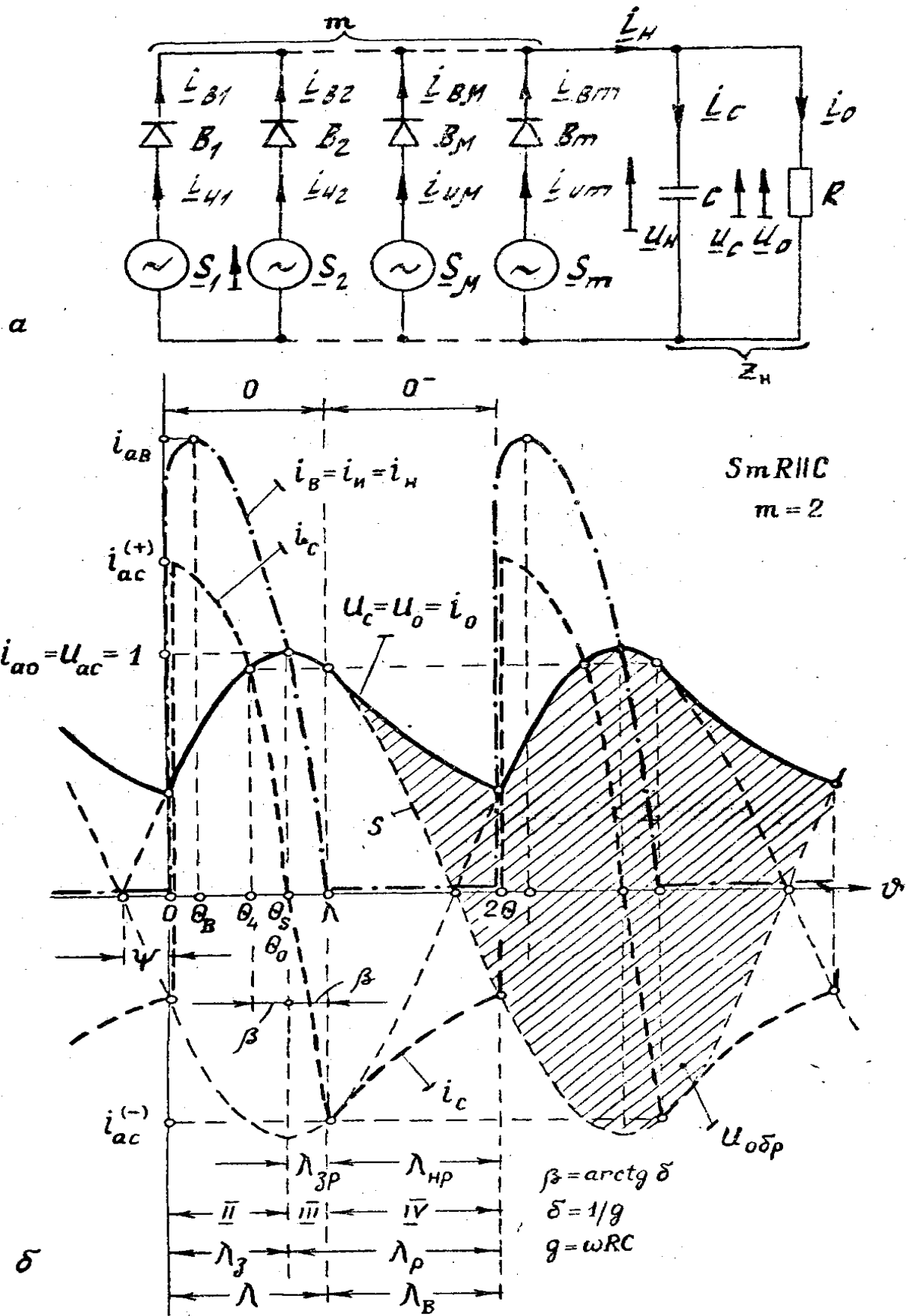


Рис. 2. Формы переменных при $m = 2$ вентильных схем класса $SmR11C$, полученные с учетом законов скачков

Совокупность устройств, объединяемых единой схемой замещения, будем относить к классу и для краткости обозначать латинскими буквами учитываемых элементов [1-3, 5]. Из рис.2, а следует, что обсуждению подлежат теории вентиляльных схем класса $S_m R I I C$. Формы переменных, разработанные для этих схем с учетом экспериментальных осциллограмм, законов (1) и решений на ЭЦВМ, даны на рис.2, б.

Из сопоставления приведенных диаграмм (Д) видно, что общий характер явлений (их макроструктура) дается на разных диаграммах в основном одинаково: в схемах протекают импульсные, зарядно-разрядные процессы; напряжение на емкости в момент открытия вентиля претерпевает излом и, первоначально совпадая по форме с эдс, превышает ее на большей части своего периода; в источниках эдс формируются узкие токовые импульсы; напряжение на выходе и ток полезной нагрузки непрерывны, хотя выходной ток прерывист (содержит паузы нулевых значений); период процессов содержит два подынтервала, соответствующих открытому и закрытому состояниям вентиля; угол проводимости вентиля меньше m -й части периода эдс и всегда меньше π и пр.

Что же касается тонкостей процессов, то здесь отличия весьма разительны. Разные авторы трактуют микроструктуру явлений самым различным и довольно произвольным образом, как правило противоречиво и в большинстве своем недостаточно правильно. Между тем знание истинности явлений, соответствующих принятым предпосылкам, имеет принципиально важное и порой определяющее значение в формировании представлений.

Формулы (1) и их следствия позволяют объективно установить имеющиеся здесь неточности, основные из которых для схем класса $S_m R I I C$ следующие (см.рис.1,2).

1. Излом кривой напряжения на емкости в момент открытия вентиля в функциональном отношении соответствует разрыву функции u_c . Так как ток i_c является производной от u_c , то в момент разрыва u_c ток i_c должен претерпеть скачок. Ток $i_o \equiv u_c$ является риджитной переменной и скачком не изменяется ($\Delta i_o = 0$). Следовательно, согласно (1) скачкообразное изменение должны претерпеть ток нагрузки i_n и образующие его токи вентиля i_v и источников эдс i_n : $\Delta i_{n,v,i} \neq 0$.

Токовые импульсы, изображенные на Д 1-3, 6-10, 12, 16, 22, 24, 27 рис.1, не имеют скачков по переднему фронту, что противоречит формулам (1).

2. Аналогично, излом U_c , изображенный на Д 4, 7, 14, 16, 24, 27 в момент закрытия вентилей, должен вызвать скачки токовых импульсов по заднему фронту, которых, однако, на диаграммах нет. Но их и не должно быть, что легко можно показать, исходя из простых физических соображений. Поэтому мы имеем здесь обратную задачу: напряжение U_c в момент закрытия вентилей не должно иметь излома, что также легко доказывается на основе формул (1).

3. Оба предыдущих случая объединяет Д 6, приведенная в [6]. Здесь импульсы тока вентилей и источника эдс, напротив, имеют скачок по заднему и не имеют его по переднему фронтам, что, как мы уже убедились, противоречит законам (1) и потому не соответствует действительным формам, показанным на рис.2,б.

4. Также не может быть скачка в форме фазной эдс, изображенного на Д 8 в момент открытия вентиля, и в форме токов емкости (Д 24) и вентиля (Д 18) в момент его закрытия.

Другие, имеющиеся несоответствия могут быть рассмотрены аналогично. К их числу относится, например, типичная неточность, внесенная еще в 20-е годы (см., например, Д 1, опубликованную в 1929 г. [7] и сохранившаяся до сих пор (см., например, Д 7, 8, 10-13, 16, 20, 22-24, 27, 28, 30, опубликованные в последнее время в многочисленной учебной литературе) о закрытии вентиля в момент достижения эдс своего максимума.

В действительности вентили закрываются позднее, что, помимо рис.2, видно также из Д 2-6, 9, 14, 15, 18, 24 рис.1, и в этом их достоинство.

Также традиционным является предположение о том, что длительности заряда Λ_z (разряда Λ_p) емкости и открытого Λ (закрытого Λ_B) состояния вентиля равны между собой: $\Lambda_z = \Lambda$, $\Lambda_p = \Lambda_B$. В действительности для любого класса схем с емкостью на выходе имеют место следующие неравенства [1-6]

$$\Lambda_z < \Lambda; \Lambda_p > \Lambda_B, \quad (7)$$

что применительно к схемам класса *SmRHC* отчетливо видно из рис.2.

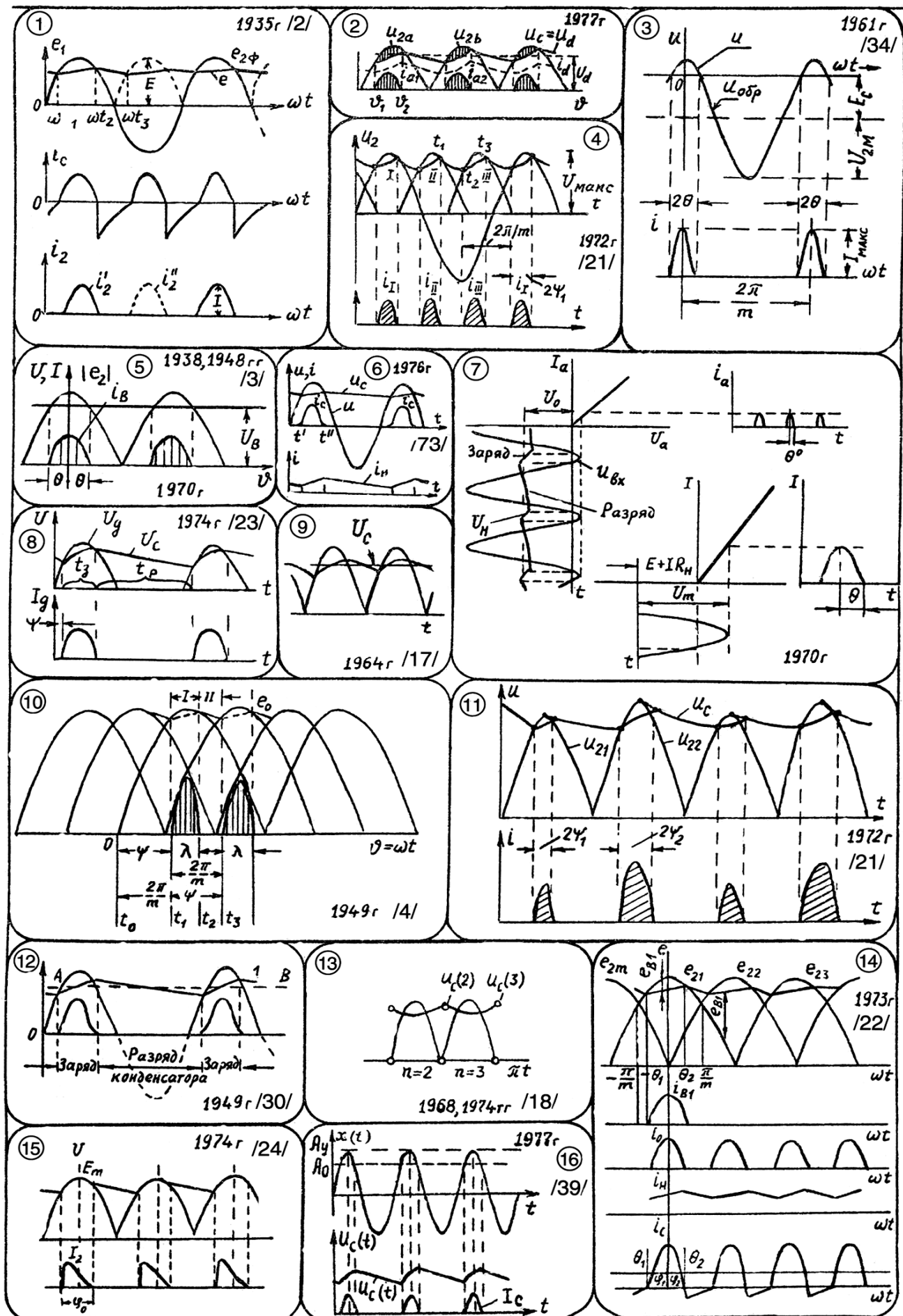
Несмотря на кажущуюся простоту, закономерность (7), выявленная с привлечением законов скачков, имеет принципиально важное значение, позволяя более качественно определять пульсации и спектр выходного сигнала [5,8].

Не имея возможности проанализировать иные особенности рассматриваемых теорий, отметим, что в опубликованных формах переменных не обосновано также следующее:

- прежнее напряжение U_c амплитуды эдс (Д 10, 25),
- начало роста U_n и, как следствие, тока полезной нагрузки, еще до открытия вентиля (Д 18, 19),
- выпуклая, а не падающая по экспоненте форма напряжения U_c в интервале независимого разряда емкости (Д 8, 12, 21, 25),
- равная π (Д 12) или 2π (Д 5) длительность импульса тока общей нагрузки,
- открытие вентиля при нулевом (Д 5) либо отрицательном (Д 29) значении входных эдс или, иначе, при отрицательном напряжении между анодом и катодом вентиля,
- заряд емкости после закрытия вентиля (Д 10, 25),
- совпадение моментов экстремальных значений эдс и токов (Д 2, 3, 5, 6, 9, 12) и т.п.

На всех диаграммах, кроме Д 15, 24, 27, отсутствует ток емкости. Однако Д 24, 27 присущи ошибки, разобранные выше, а на Д 27 ток емкости изображен к тому же однополярным, что противоречит действительности. Д 15 была построена автором с учетом (1) первоначально в 1957 (при $m=2$) и позднее (при $m=3$) в 1966, 1967 [1], 1969 [8] и 1971 годах. Однако и эта диаграмма, качественно верно отражая характер процессов, не полностью иллюстрирует количественную связь переменных, что видно из сравнения с рис.2.

Известен целый ряд иных классов вентиляльных структур с емкостным накопителем, состояние результатов по которым сходно с рассмотренным по схемам класса $SmR//C$ (см. рис.3). Наиболее полные и правильные из них для схем классов $SmrR//C$ и $SmrER//C$ даны с учетом (1) на рис.3 (окончание, нижняя часть) [5]. Сопоставление существующих теорий по этим и другим классам схем может быть выполнено аналогичным изложенному выше образом.



Продолжение следует