

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ БЕЛОРУССКОЙ ССР
Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт

На правах рукописи

Аспирант Т. Т. РОЗУМ

Исследование и расчет переходных процессов в нелинейных электрических цепях с помощью направленных графов

(05. 276 — теоретические основы электротехники)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МИНСК, 1971

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники» Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент В. М. БЛАДЫКО.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В. В. Ясинский

кандидат технических наук, доцент Г. П. Шейна

Ведущее предприятие: Минский радиотехнический институт.

Автореферат разослан «5» апреля 1971 г.

Защита диссертации состоится «21» мая 1971 г.

на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям Белорусского политехнического института.

Отзывы (в 2-х экземплярах) просим направлять по адресу: г. Минск — 27, Ленинский проспект, 65, Ученому секретарю Совета.

Дата защиты будет объявлена в газете «Вечерний Минск».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета — кандидат технических наук
Л. Л. ЧЕРВИНСКИЙ.

Технический прогресс, борьба за повышение производительности труда приводят к созданию новых аппаратов, электротехнических устройств и систем автоматики, в состав которых входят нелинейные элементы. Полное использование свойств нелинейных элементов, получение лучших характеристик, качественное проектирование электротехнических устройств и их широкое применение возможно при наличии совершенных методов расчета нелинейных электрических цепей.

Целью настоящего исследования является разработка методики расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях на основе направленных графов.

Топологические исследования электрических цепей с помощью направленных графов выполнены в ряде работ советских и зарубежных ученых. В основном эти работы относятся к области линейных цепей. Когда же схема содержит нелинейные элементы, задача часто сводится к линейной путем тех или иных преобразований, допущений.

В диссертации изложены результаты исследований по разработке методики расчета переходных процессов простейших электрических цепей со сталью, преобразователей частоты и магнитных усилителей с учетом нелинейных характеристик. Предлагаемая методика обеспечивает общий подход к решению нелинейных задач, характерна наглядностью: граф не только указывает четкий порядок вычислений, но и содержит информацию о взаимосвязях параметров переходного процесса и их влиянии на характеристики расчета. Анализ структуры графа дает сведения о том, насколько рациональна расчетная схема на его основе. Изучение связей графа подсказывает пути изменения структуры с целью улучшения расчета.

Диссертация содержит четыре главы.

В первой главе дается краткий обзор наиболее распространенных методов расчета переходных процессов в цепях с

нелинейными элементами. В настоящее время отсутствуют точные аналитические методы, позволяющие произвести анализ режима в цепи любой сложности. С этой целью, в зависимости от характера цепи и действующих в ней э. д. с., применяются различные, часто очень приближенные методы. В общем случае задача сводится к решению нелинейных дифференциальных уравнений и лишь немногие из них имеют точные решения, выраженные через известные функции.

Поэтому исследование переходных процессов в нелинейных электрических цепях представляет несомненный интерес и требует непрерывного совершенствования методов расчета.

Аналитические методы предпочтительны, так как дают возможность анализировать задачу расчета в общем виде, быстро получить ответ при любых сочетаниях параметров цепи. Однако они пригодны лишь для дифференциальных уравнений невысокого порядка и при относительно малом влиянии нелинейных членов.

Графические методы более наглядны, не связаны с необходимостью аналитического представления кривой намагничивания и исключают сопутствующую этому погрешность. Их недостаток — возможность получить решение только для конкретных значений параметров схемы.

Для существенно нелинейных дифференциальных уравнений высоких порядков решение может быть получено с помощью численных методов: Адамса, Рунге-Кутта, Милна и др. Эти хорошо разработанные методы находят самое широкое применение, хотя при их использовании совершенно исчезает наглядность физических процессов в цепи, которая немаловажна для инженерных задач.

Привлечение теории направленных графов к расчету переходных процессов нелинейных электрических цепей делает его физически наглядным, четко отображающим сущность процессов в исследуемом устройстве.

Методика, основанная на использовании графов, приемлема принципиально для любой нелинейной электрической цепи, находящейся под воздействием э. д. с. произвольной формы. Анализ структуры графа исключает при этом нерациональные варианты расчетных схем.

Во второй главе излагается методика расчета переходных процессов с помощью направленных графов на примерах простейших электрических цепей со сталью:

последовательного соединения r, L под воздействием постоянного напряжения, а также напряжений синусоидальной и прямоугольной формы;

контура r, L, C при постоянном и синусоидальном напряжении;

последовательно включенных нелинейной катушки и полупроводникового выпрямителя;

феррорезонансного стабилизатора напряжения.

Сущность метода заключается в следующем: на основании системы дифференциальных уравнений рассматриваемой цепи строится направленный граф. Порядок расчета вытекает непосредственно из структуры графа. По существу этот метод является методом последовательных интервалов с итерацией на каждом шаге, причем итерационные циклы видны на схеме графа.

В отличие от известных методов расчета переходных процессов предлагаемая методика дает возможность по направленному графу легко и быстро построить схему вычислений для любой нелинейной электрической цепи. Желаемая точность расчета может быть получена путем увеличения числа интервалов или числа итераций на каждом шаге.

Методика расчета иллюстрируется здесь на примере последовательного феррорезонансного контура, физические процессы в котором описываются дифференциальным уравнением

$$u = ir + \frac{d\psi}{dt} + u_c = ir + p\psi + u_c. \quad (1)$$

Решая его относительно ψ , получим

$$\psi = \frac{u}{p} - \frac{r}{p} i - \frac{u_c}{p}. \quad (2)$$

Для построения графа воспользуемся вспомогательными соотношениями:

$$u_c = \frac{1}{Cp} i; \quad i = \text{sh}\psi. \quad (3)$$

На основании уравнений (2) и соотношений (3) строим направленный граф (рис. 1). Схема направленного графа указывает четкий порядок вычислений.

Потокоцепление нелинейного дросселя в первом прибли-

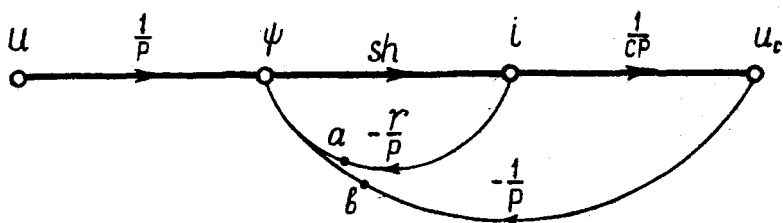


Рис. 1.

жении для $(k + 1)$ -го интервала определяется тремя входящими ветвями

$$\psi_{k+1} = \int_{t_0}^{t_{k+1}} u dt + a_k''' + \theta_k'''.$$

В этом соотношении используются приращения потокосцепления по ветвям обратных связей a_k''' и θ_k''' для момента времени t_k , последней итерации.

Ток является нелинейной функцией полученного ψ_{k+1} .

$$i_{k+1} = sh\psi_{k+1}$$

Найденному току соответствует приращение потокосцепления по ветви обратной связи $-\frac{r}{p}i$

$$a_{k+1} = -\frac{1}{2}r(i_{k+1} + i_k''')\Delta t + a_k'''$$

и напряжение на конденсаторе

$$u_{c(k+1)} = \frac{1}{2C}(i_{k+1} + i_k''')\Delta t + u_{ck}''',$$

которое вызывает приращение потокосцепления

$$\theta_{k+1} = -\frac{1}{2}(u_{c(k+1)} + u_{ck}''')\Delta t + \theta_k'''.$$

Таким образом, значения узловых сигналов в первом приближении определены. Уточнение результатов осуществляется при итерационной обработке согласно контурам обратной связи графа.

По предложенной методике выполнены расчеты переходных процессов рассматриваемого контура с различными параметрами на постоянном и синусоидальном напряжении.

Анализ влияния величины интервала и количества итераций на точность расчета и оценка точности методики выполнены на примере линейной цепи r, L . Для чего результаты вычислений на основе графа, по методам Волынкина и последовательных интервалов сравнивались с точным решением. Погрешность первых двух методов невелика — не более 0,27%, метода последовательных интервалов значительно больше — до 10,25%. Следует учесть, что метод Волынкина для расчета переходных процессов в нелинейных цепях требует вспомогательных графических построений, что сказывается на точности.

Особенности расчета переходных процессов электрических цепей со сталью, содержащих полупроводниковые выпрямители, изучены при анализе последовательно включенных цепи линейной катушки и выпрямителя. Выяснено, что при построении схемы вычислений на основании одного графа сходимость итерационных циклов обеспечивается лишь на некоторых узких участках переходного процесса.

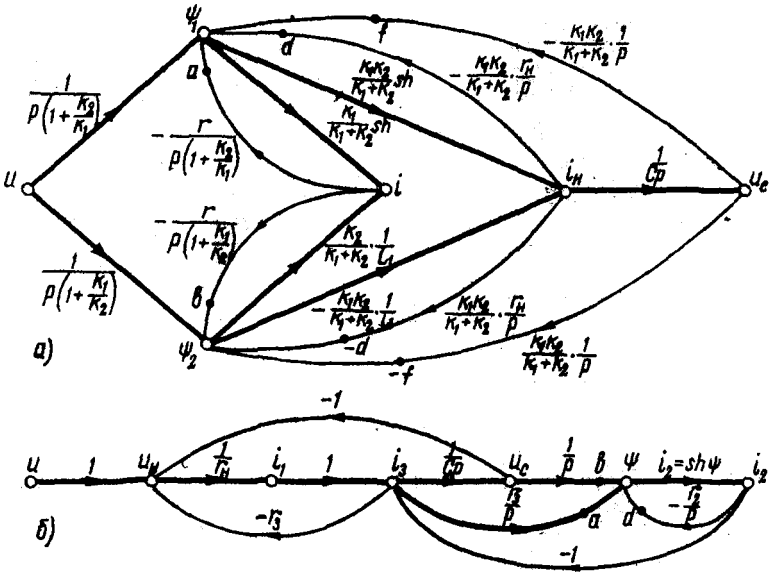
Рациональная расчетная схема может быть получена применением совокупности направленных графов, соответствующих возможным режимам работы вентиля. Область работы каждого графа определяется величиной и знаком напряжения вентиля. Выполненные расчеты достаточно близко совпадают с экспериментальными данными.

Далее разработана методика расчета переходных процессов феррорезонансного стабилизатора напряжения в различных режимах. Погрешность расчетных характеристик по сравнению с результатами осциллографирования не превышает 12%.

В третьей главе предлагается методика расчета переходных процессов в преобразователях частоты.

На примерах однофазного ферромагнитного утроителя и утроителя с резонансным контуром, направленные графы которых даны на рис. 2а, б, произведено сравнение объема вычислительной работы при ручном и машинном счете по предлагаемой методике и по методу Рунге-Кутты. Результаты сравнения представлены в таблице I.

Выполнен анализ переходных процессов утроителя с трехфазным входом системы Спинелли.



Р и с. 2.

Таблица 1

Показатели объема вычислений	Преобразователи			
	Ферромагнитный утроитель		Утроитель с резонанс- ным контуром	
	с помощью графа	по методу Рунге-Кутта	с помощью графа	по методу Рунге-Кутта
Расход м шинного времени	1'29"	3'03"	1'24"	2'30"
Объем программы (кол-во ячеек)	240 ₈	407 ₈	223 ₈	416 ₈
Количество вычисли- тельных операций на интервале (при ручном счете) . . .	106	134	84	92

$$\left. \begin{aligned}
 u &= p\psi_1 + p\psi_2 + ir; \\
 u_0 &= -p\psi_1 + p\psi_2 + p\psi_0 + i_0 r_0; \\
 -i_2 r_2 - u_c &= p\psi_1 - p\psi_2; \\
 i_1 + i_2 - i_0 &= \text{sh } \psi_1; \\
 i_1 - i_2 + i_0 &= \text{sh } \psi_2.
 \end{aligned} \right\} (4)$$

Решая ее и воспользовавшись вспомогательными соотношениями:

$$i_0 = \frac{\psi_0}{L}; \quad u_c = \frac{1}{Cp} i_2$$

получаем различные схемы направленных графов. Анализ их структуры показывает, что граф (рис. 4) обеспечивает наилуч-

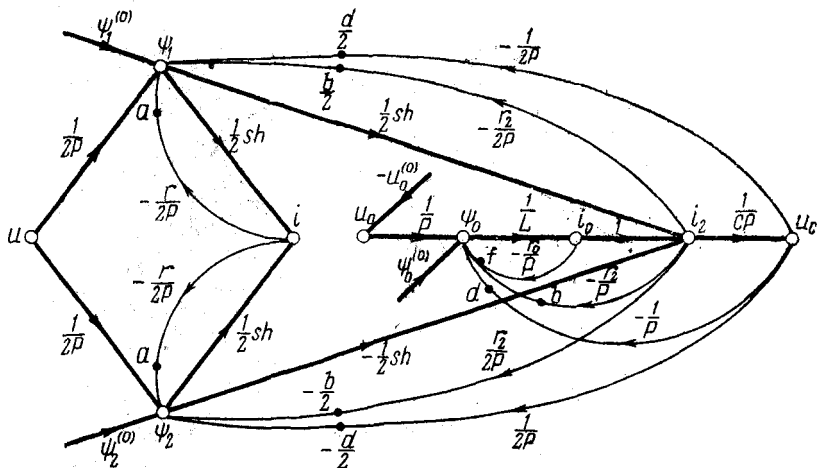


Рис. 4.

шую расчетную схему, так как все его обратные связи содержат операторы интегрирования.

Наличие постоянного или переменного потока в сердечниках в момент коммутации учтено путем введения в узлы графа ψ_1 , ψ_2 и ψ_0 дополнительных ветвей с постоянно действующими сигналами ψ_1^0 , ψ_2^0 , и ψ_0^0 , соответствующими потокоцеплениям дросселей до момента коммутации. Ненулевые начальные условия в цепи подмагничивания фиксируются введением сигнала — u_0^0 , характеризующего напряжение цепи подмагничи-

вания, предшествующее переходному процессу.

Дополнительные ветви графа с сигналами, обусловленными докоммутированным режимом, учитываются при определении узловых сигналов в первом же приближении и в процессе итерационной обработки не претерпевают изменений.

По предложенной методике на основе графа (рис. 4) проведено исследование влияния начальной фазы включения питающего напряжения и начальных условий на характер и длительность переходных процессов удвоителя. Наиболее интенсивно выражен переходный процесс в случае, когда переменное напряжение в момент включения проходит через нуль (рис. 5), продолжительность его более 10 периодов, амплитуду

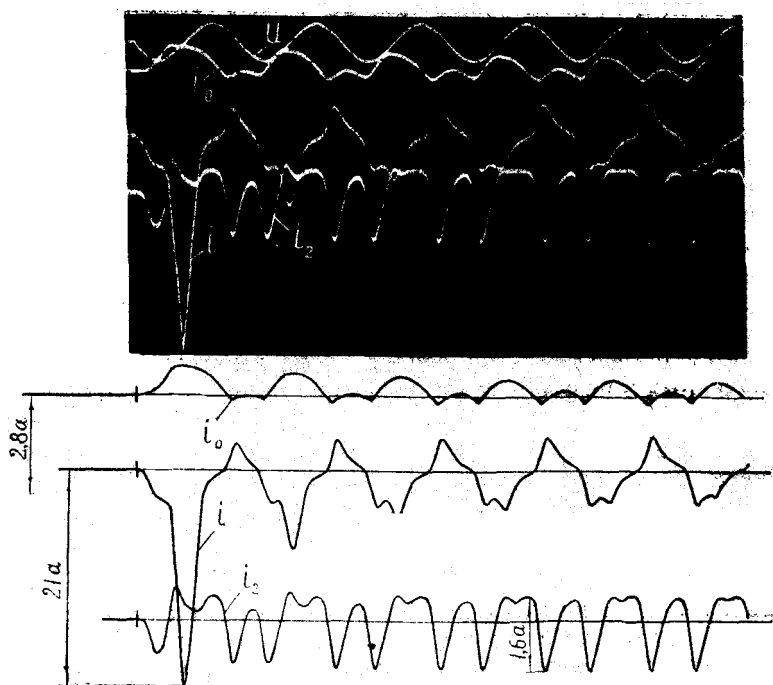
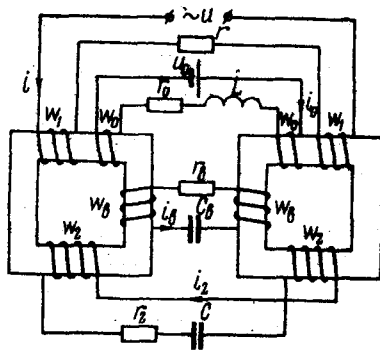


Рис. 5.

да тока i превышает установившееся значение в 6,5 раза. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что погрешность не превышает 15%.

Рассматривается методика расчета переходных процессов



Р и с. 6.

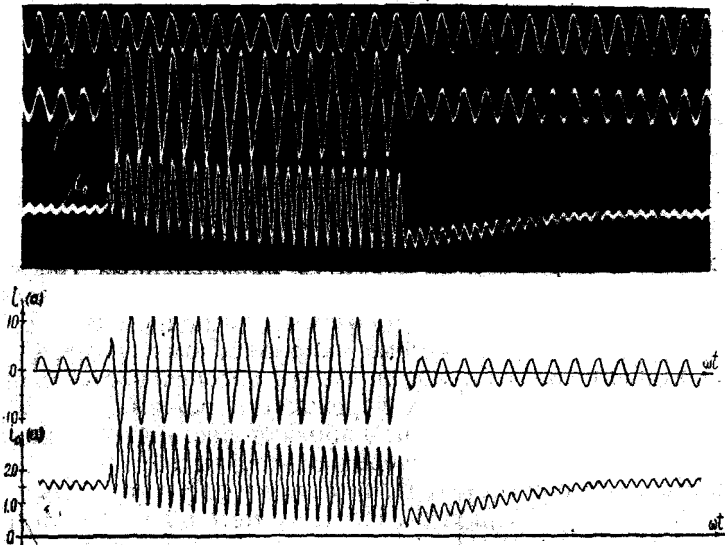
в ферромагнитном делителе частоты в два раза (рис. 6). Основной причиной возбуждения второй субгармоники в делителе является наличие некоторой неидентичности характеристик дросселей насыщения или остаточного заряда на конденсаторе в контуре возбуждения. Поэтому для исследования процесса возбуждения субгармонических колебаний в систему дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы делителя, введены коэффициенты, учитывающие различия характеристик сердечников. Выбор коэффициентов предлагается производить на основе экспериментальных данных, полученных в результате определения кривых намагничивания стали при питании дросселей со стороны обмоток возбуждения.

В расчёте рекомендуется использовать некоторую среднюю кривую намагничивания $i = \alpha \operatorname{sh} \beta \psi$, полагая, что

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}; \quad \beta = \beta_1 = \beta_2 \quad \text{и} \quad \alpha_0 = \alpha.$$

При этом число витков одноименных обмоток в основных уравнениях делителя будет неодинаковым и обратно пропорциональным коэффициентам аппроксимации (α_1 и α_2 , α_{s1} и α_{s2} реальных кривых).

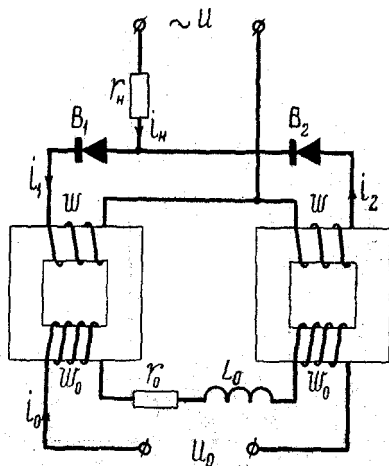
С учетом изложенного построен направленный граф (рис. 7) и на его основе разработана методика расчета переходных процессов делителя. Дан численный пример. Расчетным путем проведено исследование влияния начальных условий и начальной фазы включения переменного напряжения на характер и



Р и с. 10.

циклов. Результаты исследований подтверждают информацию полученную при анализе структуры графа.

Магнитный усилитель с внутренней обратной связью рассмотрен в режиме чисто активной (рис. 11) и смешанной нагрузки.



Р и с. 11.

Уравнения, описывающие физические процессы приведенного усилителя ($W_0 = W_1$) при активной нагрузке, следующие:

$$\left. \begin{aligned} u &= p\psi_1 + i_1 r + i_n r_n + u_{e1}; \\ -u &= p\psi_2 + i_2 r - i_n r_n + u_{e2}; \\ u_0 &= p\psi_1 + p\psi_0 + i_0 r_0; \\ i_n &= i_1 - i_2; \\ i_1 + i_0 &= \text{sh}\psi_1; \\ i_2 + i_0 &= \text{sh}\psi_2. \end{aligned} \right\} (5)$$

Исследование различных структур направленных графов, построенных на основе уравнений (5), показало, что расчет переходного процесса МУ не может быть выполнен, если расчетная схема строится по одному направленному графу. Сходимость итерационных циклов при этом обеспечивается лишь на некоторых узких участках переходного режима. Так как выпрямители обратной связи не работают постоянно в одинаковых условиях (они или поочередно заперты обратными напряжениями, или оба открыты), то следует рассматривать три возможных режима их работы. Поэтому методика расчета переходных процессов МУ с внутренней обратной связью построена на использовании совокупности трех направленных графов, соответствующих трем указанным режимам работы выпрямителей обратной связи.

Предложено три направленных графа МУ в режиме чисто активной нагрузки (рис. 12, 13, 14) и три графа в режиме сме-

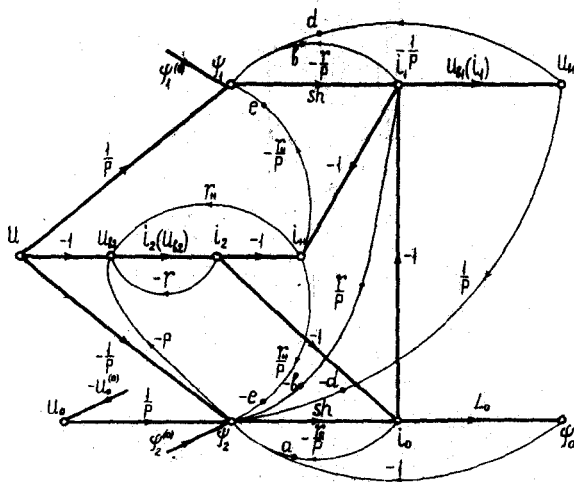
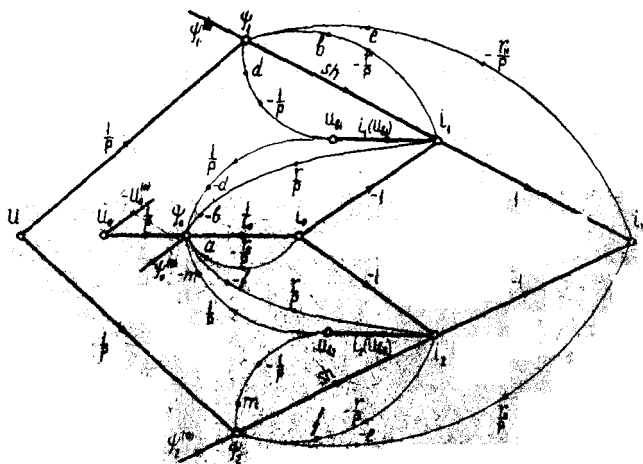
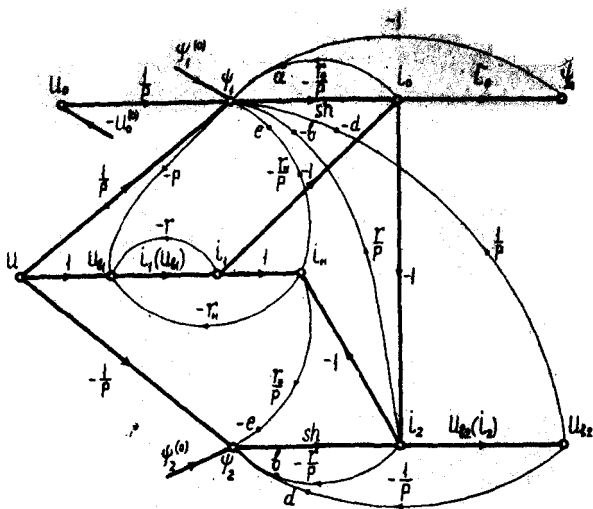


Рис. 12.



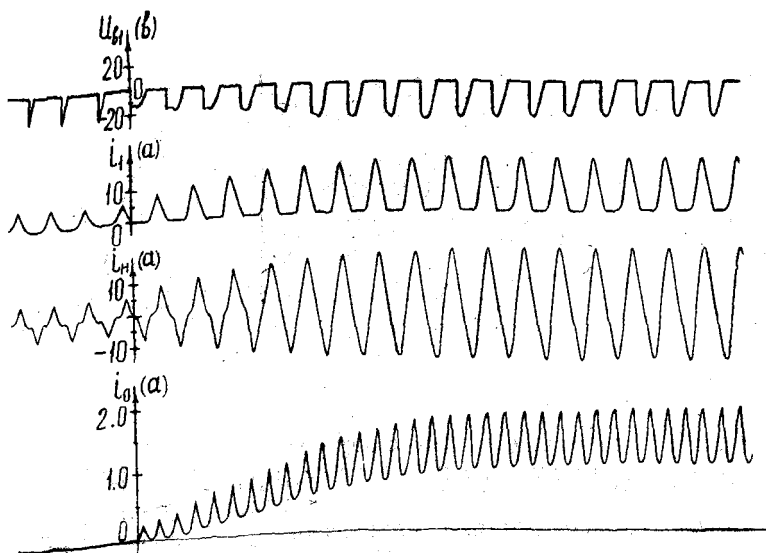
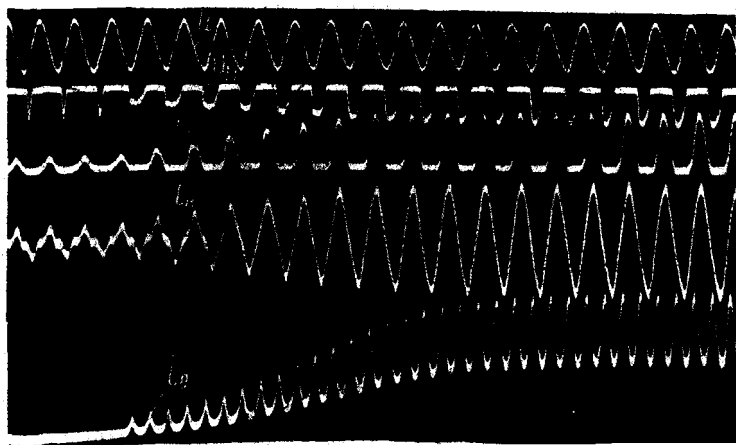
Р и с. 13.



Р и с. 14.

шанной нагрузки. Совместное использование таких трех графов дает наилучшие результаты при построении расчетной схемы. Область работы каждого графа определяется величиной и знаком напряжения вентилях.

По предложенной методике выполнены расчеты переходных процессов МУ с внутренней обратной связью при идеальной характеристике полупроводниковых выпрямителей и при кусочнолинейной аппроксимации реальной характеристики (рис. 15). Рассчитаны коммутационные режимы с различными начальными условиями.



Р и с. 15.

Сопоставление результатов эксперимента и расчетов показывает их достаточно близкое совпадение. Максимальная погрешность по амплитудам токов не превышает 12%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Предложен метод расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях с использованием направленных графов исследуемых цепей. Основными достоинствами метода являются:

- а) простота и наглядность;
- б) применимость метода для анализа процессов в любой нелинейной электрической цепи при воздействии э. д. с произвольной формы;
- в) уменьшение объема вычислительной работы при удовлетворительной точности полученных результатов.

2. Проведены исследования по применению разработанной методики для расчета переходных процессов простейших электрических цепей со сталью, преобразователей частоты и магнитных усилителей.

3. Выполненные исследования показали, что наиболее рациональная расчетная схема обеспечивается при следующих особенностях структуры графа:

- а) обратные связи отрицательны и содержат оператор интегрирования;
- б) обратные связи без операторов интегрирования входят в контур, ветви которого имеют передачи с оператором интегрирования;
- в) коэффициенты передач ветвей, характеризующих электрические цепи со сталью без вентилях, не содержат операторов дифференцирования.

4. Сравнение объема вычислений при расчете переходных процессов утроителей частоты по предлагаемой методике и по методу Рунге-Кутты дает основание сделать вывод о целесообразности применения направленных графов. Использование графов для расчета уменьшает расход машинного времени, объем программы и количество вычислительных операций.

5. Для всех рассмотренных устройств даны численные примеры расчета, параллельно выполнены экспериментальные исследования. Проведен анализ влияния начальных условий и

начальной фазы включения питающего напряжения на характеристики переходных режимов. Погрешность расчетов в сравнении с результатами осциллографирования преимущественно не превышает 15%.

Результаты работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института 1969—1971 гг. и опубликованы в следующих статьях:

1. Бладыко В. М., Розум Т. Т. Расчет переходных процессов в электрических цепях со стальной с помощью направленных графов. «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1967, №4.

2. Розум Т. Т. Применение направленных графов при расчете переходного процесса в феррорезонансном стабилизаторе напряжения. «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1968, №12.

3. Бладыко В. М., Розум Т. Т. Применение направленных графов при расчете переходного процесса в утроителе частоты. «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1970, №1.

4. Розум Т. Т. Сравнение расчета переходных процессов в однофазных утроителях частоты по методу графов и по методу Рунге-Кутты. «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1970, №6.

5. Бладыко В. М., Розум Т. Т. Исследование переходных процессов в ферромагнитном удвоителе частоты при помощи направленного графа. «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1970, №12.

6. Бладыко В. М., Розум Т. Т. Исследование переходных процессов в ферромагнитном делителе частоты в два раза с помощью направленного графа. «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1971, №1.