

6  
А-43

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

НОВОЧЕРКАССКИЙ ордена Трудового Красного Знамени  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ институт имени Серго Орджоникидзе

---

На правах рукописи

СЕНЧУКОВ А. А.

**Разработка и исследование  
устройств для выявления  
дефектной изоляции кабелей**

254. Автоматическое управление и регулирование  
в энергетической промышленности

**Автореферат**

диссертации, представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**НОВОЧЕРКАССК—1989**



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

НОВОЧЕРКАССКИЙ ордена Трудового Красного Знамени  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ институт имени Серго Орджоникидзе

---

На правах рукописи

СЕНЧУКОВ А. А.

**Разработка и исследование  
устройств для выявления  
дефектной изоляции кабелей**

254. Автоматическое управление и регулирование  
в энергетической промышленности

**Автореферат**

диссертации, представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

НОВОЧЕРКАССК—1969



## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Директивами XXIII съезда КПСС большое развитие в нашей стране получают электрические сети с напряжением 0,4÷20 кв, длина которых за пятилетие увеличится на 1,5 млн. км. В условиях городов и промышленных предприятий основной удельный вес в сетях указанного напряжения составляют кабельные линии, роль которых ежегодно повышается. В крупных энергосистемах до 70÷80% всей вырабатываемой электроэнергии доводится до потребителей через кабельные сети. Абсолютная повреждаемость кабельных линий достаточно высока и в 2—3 раза превышает повреждаемость любого другого оборудования. В этих условиях необходимо уделять особое внимание разработке и исследованию новых методов и устройств для выявления дефектной изоляции силовых кабелей.

Существующие устройства для испытания изоляции кабелей громоздки, и применение их на промышленных предприятиях широко развитой кабельной сетью, например многэтажные РУ, шахтные кабели, вызывает большие транспортные и эксплуатационные неудобства.

В технологии ремонта силовой кабельной линии основная составляющая затрат труда и времени приходится на прожигание изоляции. Существующие устройства, предназначенные для этой цели, имеют ряд недостатков, а представляющий интерес резонансный метод недостаточно изучен.

Настоящая работа посвящена решению следующих задач:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование резонансных прожигающих установок.

2. Разработка резонансной прожигающей установки с улучшенными параметрами.



3. Разработка и исследование эффективного метода прожигания с автоматическим переключением источников.

4. Разработка малогабаритной переносной установки для испытания кабельной изоляции.

### 1. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПРОЖИГАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ТИПА РА-2

Опыт эксплуатации выпускаемых в настоящее время резонансных трансформаторов типа РА-2 показал, что они малоэффективны при прожигании повреждений в муфтах, причем, попытки длительного дожига мест повреждения приводят в большинстве случаев к выходу из строя резонансного аппарата. В связи с этим были проведены исследования электрических и тепловых режимов работы резонансных трансформаторов в целях выяснения причин их повреждаемости и составления рекомендаций по устранению недостатков. Сопоставление результатов исследования с паспортными данными, приведенное в таблице 1, показывает, что возбуждаемое напряжение составляет 75% от паспортного значения, а рабочий диапазон и резонансные значения емкостей существенно смещены. Это связано с тем, что при подходе к резонансным условиям сердечник трансформатора насыщается.

Таблица 1

Наименование параметра	Паспортные данные	Опытные данные
Максимальное напряжение на емкости, основной вывод (резонанс напряжений)	29,5 кв	22,0 кв.
То же для отпайки	7,3 кв	6,8 кв
Рабочий диапазон емкостей при 15 кв	0,63 ÷ 1,3 мкф	0,85 ÷ 1,65 мкф
Емкость при резонансе напряжений	1,16 мкф	1,65 мкф
Емкость при резонансе токов	0,38 мкф	0,45 мкф
Режим повторного включения при резонансе напряжений	50%	0,2%
То же при прожигании	70%	9%

Низкие значения ПВ объясняются тем, что плотность тока во вторичной обмотке достигает  $20 \text{ а/мм}^2$ , а отвод тепла от нее осуществляется крайне неудовлетворительно. К недостаткам

резонансного трансформатора типа РА-2 также могут быть отнесены:

— отсутствие контроля режима работы резонансного трансформатора, что не позволяет судить о состоянии аппарата и может приводить к его сгоранию;

— отсутствие устройства для плавной настройки в резонанс, что не позволяет регулировать процесс прожигания и получать наибольшие напряжения.

Частичное устранение недостатков без изменения параметров резонансного трансформатора может быть осуществлено введением контроля теплового состояния и включением дополнительной регулируемой индуктивности. Тепловое состояние целесообразно контролировать по показаниям амперметра, включенного в цепь вторичной обмотки, являющейся в тепловом отношении наиболее слабым звеном. Допустимая длительность работы резонансного трансформатора в зависимости от тока в его вторичной обмотке дана в таблице 2.

Таблица 2

$I_2, \text{ а}$	12	8	6	4	3	2
$t, \text{ мин}$	1	3	6	9	15	30

Исследования показали, что большинство недостатков может быть устранено после конструктивных изменений (увеличением сечения стали магнитопровода и выбором числа витков обмоток). Насыщение сердечника можно исключить при любых значениях емкости, снизив напряжение питания до  $U_{1 \text{ расч}} = 90 \text{ в}$  (см. рис. 1). Практически более целесообразно увеличить число витков первичной обмотки до  $\omega_{1 \text{ расч}} = 730$  витков при номинальном напряжении питания. В обоих случаях существенно увеличится допустимая длительность включения, однако напряжение на емкости не превысит 22 кв. макс. Для того чтобы резонансный трансформатор мог обеспечивать напряжения, возбуждаемые на емкости более чем 22 кв. макс, и при этом сохранять линейной магнитную систему, необходимо увеличивать сечение сердечника. Целесообразные параметры резонансного трансформатора определяются на основании разработанной методики расчета. Ниже приведены рекомендуемые данные, определенные из условия неизменности размеров резонансного трансформатора:  $U = 30 \text{ кв. макс}$ ;  $Q_c = 50 \text{ см}^2$ ;  $\omega_1 = 625$  витков;  $q_1 = 5,4 \text{ мм}^2$ ;  $\omega_2 = 9600$  витков;  $q_2 = 0,58 \text{ мм}^2$ ;



$\delta = 11 \text{ a/мм}^2$ . Число витков вторичной обмотки практически не меняется, а плотность тока уменьшается вдвое. Последнее увеличивает допустимое время работы в 4 раза.

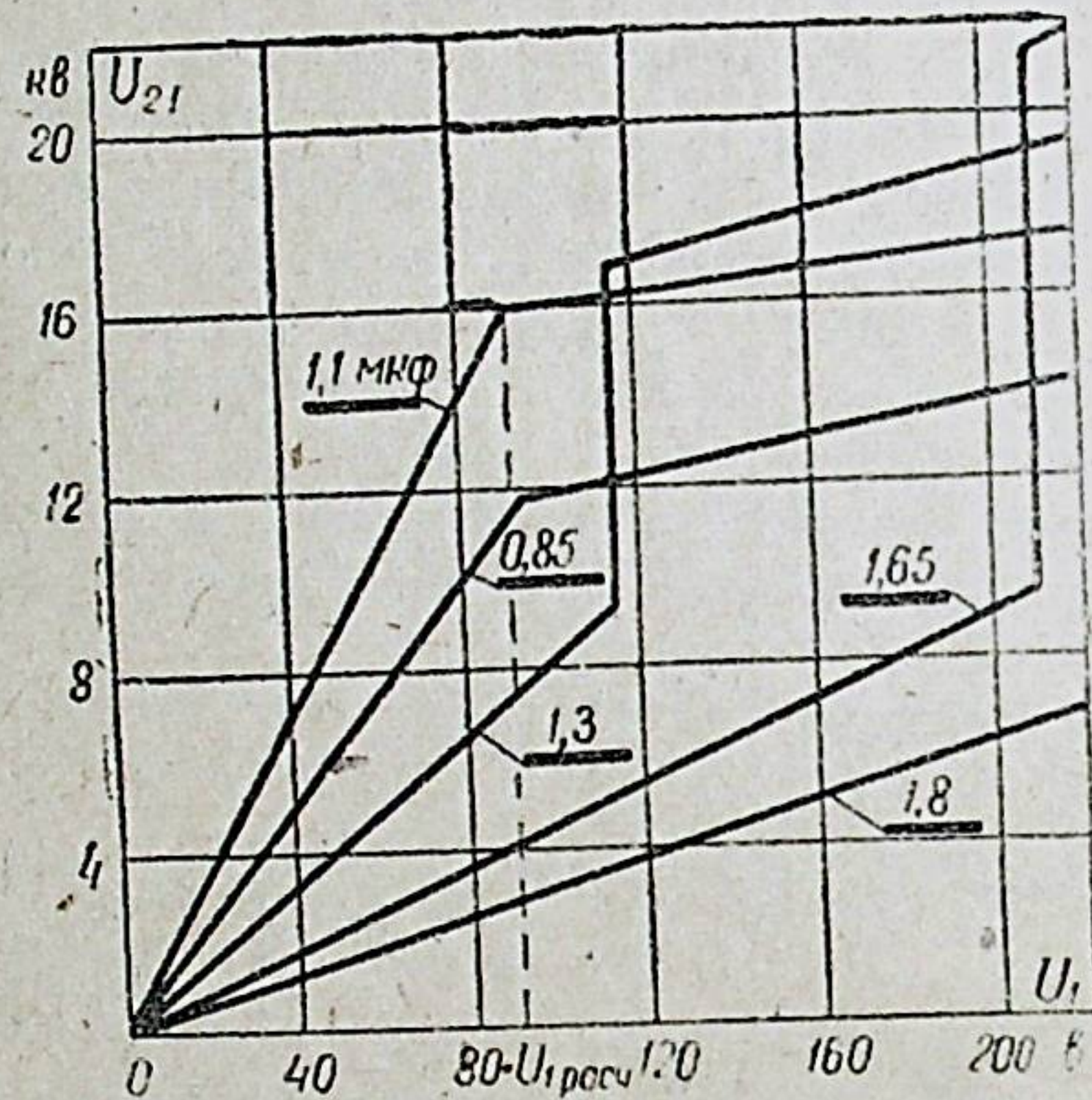


Рис. 1 Зависимость напряжения на емкости, от первичного напряжения для резонансного трансформатора типа РА-2.

В диссертации даются рекомендации по улучшению системы охлаждения.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ПРОЖИГАЮЩИХ УСТАНОВОК С РЕГУЛИРУЕМОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Как показали проведенные исследования [1, 6], наиболее рациональной является регулируемая резонансная установка с последовательно включенной индуктивностью. Схема замещения такой установки приведена на рис. 2.

Здесь  $r_2$  — активное сопротивление меди дросселя и трансформатора;

$L_2$  — индуктивность рассеяния дросселя и трансформатора;

$r_0$  — нелинейное сопротивление потерь в стали дросселя;

$L_0$  — переменная нелинейная индуктивность дросселя;

$C_k$  — емкость кабеля и балластного конденсатора;  
 $r_k$  — активное сопротивление кабеля;  
 $r_n$  — переходное сопротивление в месте повреждения кабеля.

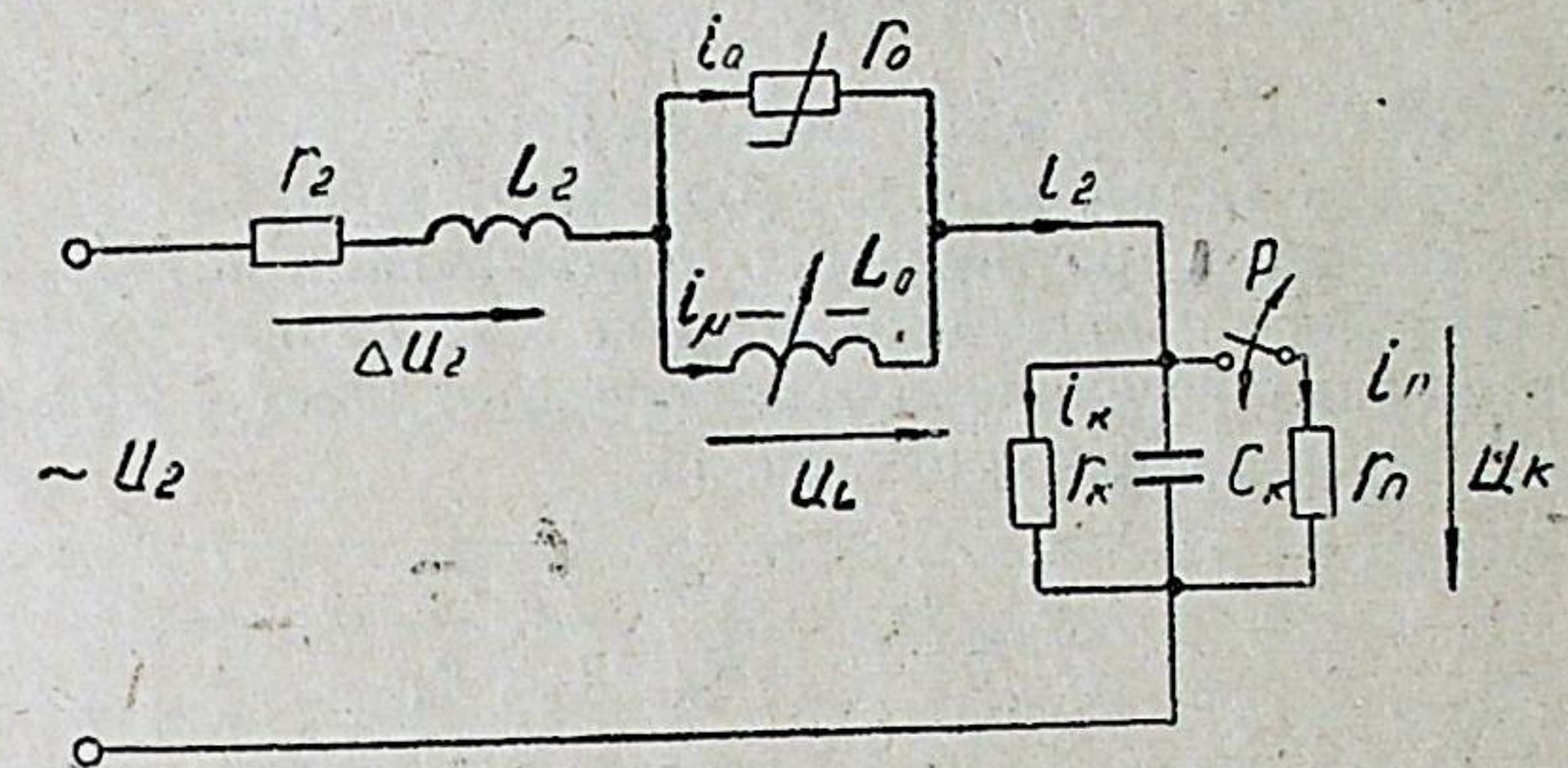


Рис. 2 Схема замещения резонансной прожигающей установки с последовательно включенной регулируемой индуктивностью

При исследовании в общем виде соотношение между мгновенными значениями напряжения и тока имеет вид:

$$u_2 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{d\psi}{dt} + \int \exp\left(-\frac{r_k + r_n}{C_k r_k r_n} t\right) \cdot \frac{1}{C_k} \int i_2 \exp\left(\frac{r_k + r_n}{C_k r_k r_n} t\right) dt. \quad (1)$$

Для установившихся синусоидальных режимов при отсутствии насыщения выражение (1) может быть записано в символической форме:

$$\dot{U}_2 = \left( r_2 + j\omega L_2 + \frac{j\omega L_0 r_0}{j\omega L_0 + r_0} + \frac{1}{\frac{r_k + r_n}{r_k \cdot r_n} + j\omega C_k} \right) \dot{i}_2. \quad (2)$$

Основным параметром контура, определяющим напряжение, возбуждаемое на реактивных элементах схемы в условиях



резонанса, является добротность  $Q$ , значение которой для схемы рис. 2 может быть записано в виде

$$Q = \frac{1}{x_{рез} \left( \frac{1}{r_o} + \frac{1}{r_n} \right) + tg\delta + \frac{r_2}{x_{рез}}}, \quad (3)$$

где  $tg\delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь изоляций кабеля. Как видно из (3), добротность контура при известных постоянных сопротивлениях, учитывающих потери, зависит от реактивного сопротивления цепи в условиях резонанса  $x_{рез}$ . Оптимальная величина этого сопротивления, соответствующая максимуму добротности, равна

$$x_{рез.опт} = \sqrt{\frac{r_o \cdot r_n}{r_o + r_n} \cdot r_2}. \quad (4)$$

При этом

$$Q_{макс} = \frac{1}{2 \sqrt{\frac{r_o + r_n}{r_o \cdot r_n} \cdot r_2 + tg\delta}}. \quad (5)$$

Анализ зависимостей (3), (4), (5) показывает, что добротность контура имеет слабо выраженный максимум и в большом диапазоне изменения  $x_{рез}$  не наблюдается резкого ухудшения добротности. Значительное влияние на добротность оказывает состояние изоляции кабеля ( $tg\delta$ ,  $r_n$ ). Диапазон изменения  $x_{рез}$  задается данными кабельной сети, для которых в соответствии с (4) могут быть рекомендованы оптимальные (по добротности) параметры резонансной установки. Так, при диапазоне изменения кабельной емкости  $0,2 \div 0,7$  мкф;  $tg\delta = 0,01$ ,  $r_n = 200$  ком добротность контура будет удовлетворительной ( $Q \geq 25$ ) при сопротивлении потерь в дросселе  $r_o \geq 400$  ком,  $r_2 \leq 300$  ом.

Для оценки величины возбуждаемого напряжения от параметров поврежденного кабеля в диссертации приведены зависимости  $U_{ст}(r_n, tg\delta, C_k)$ , построенные в соответствии с (3).

Выполненный анализ позволяет установить характерные соотношения между параметрами резонансной цепи только для частного случая установившегося синусоидального режима. Фактически резонансная цепь установки представляет со-

бой феррорезонансный контур (с выраженной нелинейностью), параметры которого принужденно меняются в зависимости от вариаций воздушного зазора  $\Delta$  сердечника. При включениях в условиях, близких к резонансу, в цепи возникают биения, частота которых непрерывно изменяется в зависимости от регулировки зазора и нелинейных свойств сердечника. Кроме того, в процессе прожигания многократные пробои изоляции вызывают дополнительные периодические изменения параметров контура, что значительно усложняет анализ. Для установки с последовательно включенным регулируемым дросселем такие режимы описываются нелинейным дифференциальным уравнением третьего порядка с переменными коэффициентами. Применение аналоговой вычислительной машины (АВМ) позволило решить задачу с учетом всех особенностей процессов, получить общую физическую картину явлений и оценить влияние параметров схемы в самых различных режимах.

При исследовании приняты следующие допущения, подтвержденные опытными данными.

1. Индуктивность рассеяния дросселя мало зависит от величины зазора, и поскольку ее влияние на процессы в цепи не является определяющим, то с погрешностью, не превышающей 1—2%, можно принять  $L_2 = const$ .

2. Индуктивность дросселя, обусловленная основным потоком, зависит от тока и зазора  $L_o(i_2, \Delta)$ . При исследовании на АВМ использовано семейство кривых  $\psi(i_2)$ , полученных экспериментально при различных зазорах.

3. Активное сопротивление, учитывающее потери в стали дросселя, заметно меняется при малых напряжениях, соответствующих режимам глубокой расстройки контура, когда процессы в цепи определяются другими элементами ( $L_o, C_k$ ). В условиях, близких к резонансу, величина  $r_o$  стабилизируется и мало зависит от зазора, тока и напряжения на дросселе. Поэтому при моделировании принято  $r_o = const$ , соответствующее наибольшим потерям в стали дросселя.

4. Активное сопротивление в месте повреждения кабеля принимается постоянным для каждого конкретного режима. Изменение переходного сопротивления в процессе прожигания учитывается путем последовательного решения ряда задач с разными значениями  $r_n$ .

5. Принято, что потери в стали дросселя определяются не напряжением  $u_L = \frac{d\psi}{dt}$ , а напряжением  $u_L = \frac{d\psi^2}{dt}$ , где



$\psi_1 = \psi + L_2 i_2$ . Это допущение дает незначительную погрешность, так как при реальном соотношении параметров  $\psi \gg L_2 i_2$ , а потери в стали несколько завышаются, что идет в запас добротности.

Принятые допущения, практически не влияя на точность результата, позволяют реализовать модель по устойчивому алгоритму:

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow u_2 \\ \xrightarrow{6'} r_2 i_2 \\ \xrightarrow{7'} u_k \end{array} \right\} \xrightarrow{1} \frac{d}{dt} (\psi + L_2 i_2) \xrightarrow{2} (\psi + L_2 i_2) \xrightarrow{3} \psi \rightarrow i_\mu \xrightarrow{4} i_2 \xrightarrow{5} i_a \xrightarrow{6} i_2 \xrightarrow{7} u_k \quad (6, a)$$

Соответствующие уравнения:

1.  $\frac{d}{dt} (\psi + L_2 i_2) = u_2 - i_2 r_2 - u_k$ ,
2.  $\psi + L_2 i_2 = \int (u_2 - i_2 r_2 - u_k) dt$ ,
3.  $\psi = (\psi + L_2 i_2) - L_2 i_2$ .
4.  $i_\mu = i_\mu(\psi)$ ,
5.  $i_a = \frac{1}{r_o} (u_2 - u_k - i_2 r_2)$ ,
6.  $i_2 = i_\mu + i_a$ ,
7.  $u_k = \frac{1}{C} \int (i_2 - i_k) dt$ .

(6, б)

Реализация линейных уравнений системы (6, б) осуществляется на стандартных блоках и не требует пояснений. Структурная схема модели дана на рис. 3. Моделирование характеристик намагничивания  $i_\mu(\psi)$  производится следующим образом. Из характеристики  $i_\mu(\psi)$ , снятой при полностью вдвинутом сердечнике ( $\Delta = 0$ ), вычитается линейная часть  $k\psi$ , воспроизводимая с помощью масштабного усилителя 4. Оставшаяся часть набирается на универсальном блоке нелинейностей 4<sup>1</sup>. Увеличение коэффициента усиления звена 4, то есть изменение наклона прямой  $k\psi$ , эквивалентно увеличению воздушного зазора. Ток намагничивания  $i_\mu$  получается суммированием выходных напряжений звеньев 4 и 4<sup>1</sup>. Такой прием позволил использовать стандартные элементы машины и имити-

ровать изменение воздушного зазора переключением одной курбелли.

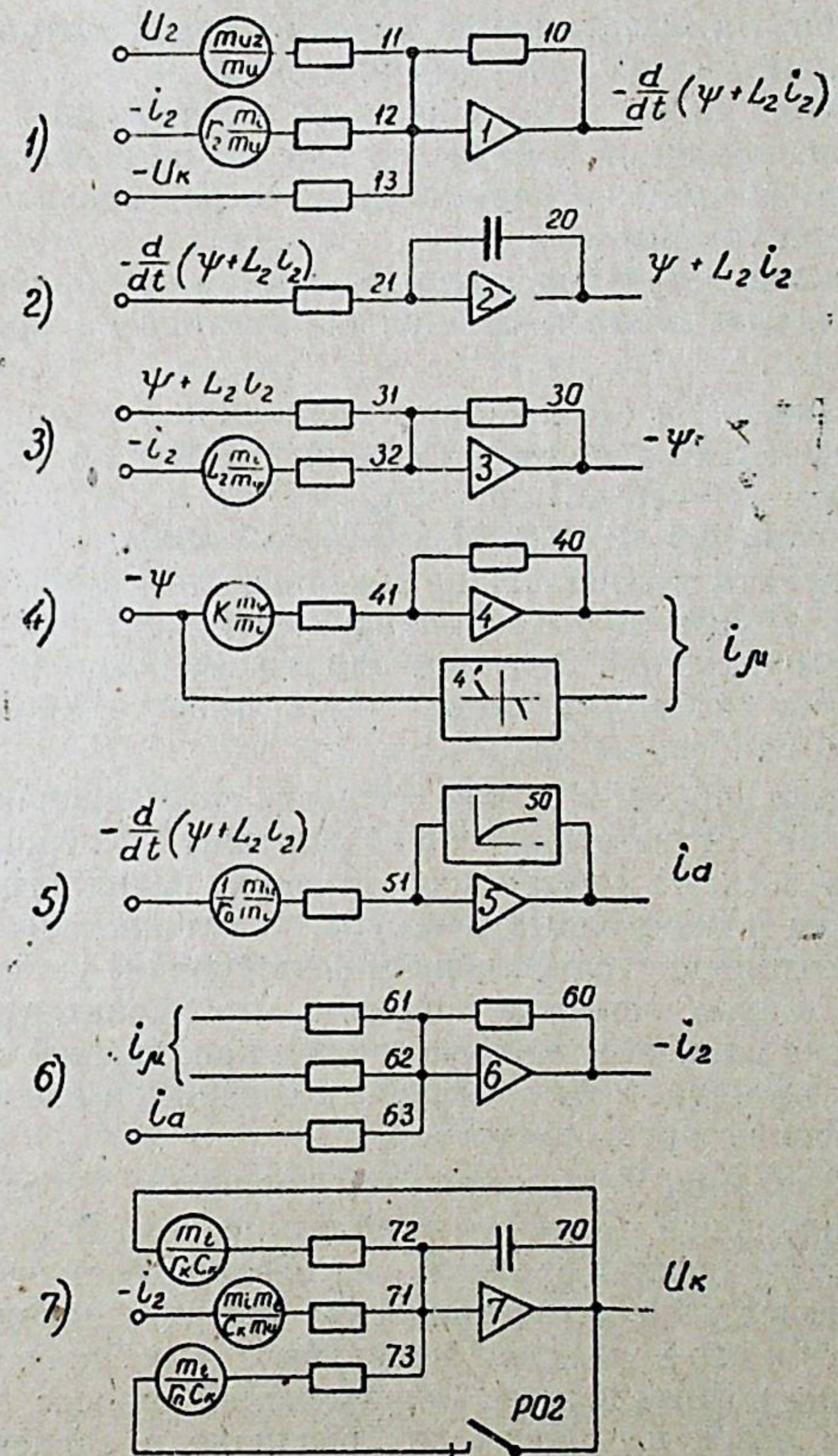


Рис. 3. Структурная схема модели.

Для воспроизведения режима многократных пробоев в модели предусмотрено автоматическое включение переходного сопротивления  $r_n$ , шунтирующего емкость при  $[u_k] \geq u_{пр}(u_k -$



напряжение, возбуждаемое на емкости;  $u_{пр}$  — напряжение пробоя). При уменьшении  $u_k$  до напряжения восстановления изоляции  $u_0$  сопротивление  $r_n$  отключается.

Программа исследований на АВМ предусматривала выполнение следующих основных разделов:

— исследование установившихся и переходных режимов без пробоев изоляции кабеля для выяснения особенностей физики явлений и оценки влияния параметров кабеля на работу резонансной установки;

— исследование переходных режимов при пробоях изоляции кабеля для оценки влияния параметров на процесс прожигания.

Указанные исследования проводились при следующих параметрах кабеля и установки:  $r_2 = 165$  ом,  $L_2 = 4,4$  гн,  $r_0 = 1$  Мом,  $L_0 = 56 \div 15$  гн,  $U_{2m} = 1770$  в,  $u_{пр} = 0 \div 30$  кв,  $r_n = 0 \div 10$  Мом,  $tg\delta = 0 \div 0,2$ ,  $C_k = 0,25 \div 0,7$  мкф.

Результаты исследования фиксировались путем замера по приборам амплитуды токов и напряжений, подсчета числа разрядов в секунду при заданном напряжении пробоя, вычисления энергии разряда, а также путем записи наиболее характерных осциллограмм процессов.

Отладка модели и оценка точности моделирования производились по соответствию общей картины электромагнитных процессов в схеме и путем сопоставления осциллограмм установившихся и переходных режимов, полученных на модели и экспериментально. Контрольное моделирование установившихся и переходных режимов показало, что характер процессов практически одинаков. Кривые токов и напряжений совпадают по форме, величине и фазовым соотношениям, а относительная погрешность не превышает 5%.

Исследования установившихся режимов (без пробоев) производились при регулировке индуктивности за счет изменения зазора сердечника дросселя для различных значений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляции кабеля. Установлено, что вследствие нелинейности у дросселя (при наибольших возбуждаемых напряжениях) процесс настройки контура в резонанс происходит различно в зависимости от увеличения или уменьшения зазора. С ростом зазора по мере приближения к условиям резонанса уменьшение индуктивности происходит интенсивнее за счет насыщения системы. Поэтому точку резонанса зафиксировать трудно, хотя система в целом работает устойчиво. При подходе к условиям резонанса путем уменьшения зазора, насыщение замедляет нарастание

индуктивности. Поэтому любой установившийся режим до момента резонанса может быть легко зафиксирован. Однако при наличии возмущающих воздействий непосредственно в дорезонансном режиме установка будет работать неустойчиво: при случайном снижении тока в схеме наблюдается триггерный эффект с переходом в режим глубокой расстройки контура с преобладанием индуктивности.

Таким образом, процесс настройки резонансного контура путем увеличения зазора может быть рекомендован для режимов прожигания изоляции, а процесс настройки контура путем уменьшения зазора целесообразен для режимов испытания.

К переходным режимам без пробоев изоляции отнесены режимы включения и отключения резонансной установки.

Выполненные исследования показали, что для реальных соотношений параметров возникающие при включении биеения не опасны, так как во всех случаях не превышают наибольших резонансных значений. Это объясняется тем, что при значительной расстройке контура, хотя амплитуда биеений может вдвое превышать установившееся значение данного режима, последнее мало вследствие некомпенсированного реактивного сопротивления; в тех случаях, когда расстройка контура мала и установившиеся значения близки к резонансным, период биеений настолько велик, что к моменту достижения первого максимума свободные составляющие тока и напряжения практически затухнут.

Режимы отключения не опасны для кабеля и дросселя, но могут вызвать перенапряжения на обмотках питающего трансформатора.

Для анализа переходных режимов при пробоях изоляции были сняты семейства зависимостей числа пробоев в секунду от напряжения пробоя  $n(u_{пр})$  при различном переходном сопротивлении в месте повреждения, а также измерена энергия, выделяющаяся в месте повреждения [2]. Энергия, доставляемая в место повреждения, и частота пробоев являются основными величинами, определяющими режим прожигания. Процесс прожигания существенно зависит и от физических условий в месте повреждения (пробой в целом месте или муфте, свойства диэлектрика). Энергия и частота импульсов определяются переходным сопротивлением в месте повреждения, напряжением пробоя и емкостью кабеля. Указанные параметры, а также вид повреждения, как правило, известны. Это позволяет выбрать наиболее эффективный режим прожигания соответствующей настройкой резонансной установки. Последнее дости-



гается регулированием индуктивности, изменением емкости и включением между установкой и поврежденной жилой разрядного промежутка с заданным напряжением пробоя. На рис. 4 представлены рассчитанные на модели графические зависимости, позволяющие определить характер прожигания и выбрать оптимальный режим.

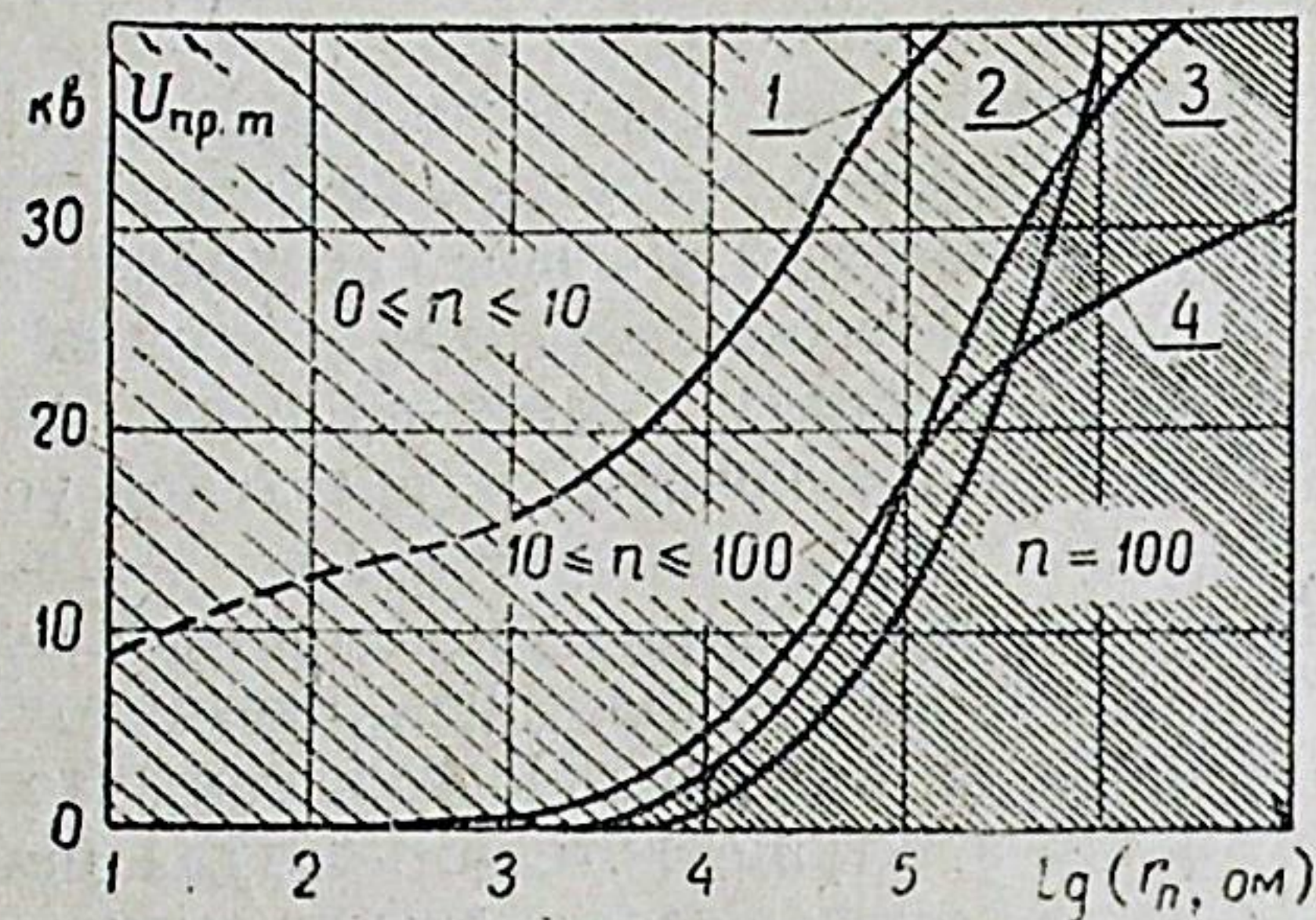


Рис. 4. Графики для определения числа пробоев в зависимости от параметров кабеля 1)  $n=10$ ,  $C=0,5$  мкф; 2)  $n=100$ ,  $C=0,25$  мкф; 3)  $n=100$ ,  $C=0,5$  мкф; 4)  $n=100$ ,  $C=1,0$  мкф.

При повреждении в целом месте прожигание проходит эффективно в широком диапазоне изменения параметров кабеля и специальной регулировки не требуется. Прожигание повреждений в муфтах с вязкими наполнителями требует большой частоты пробоев, для того чтобы место повреждения не успевало заплывать. Наибольшая частота пробоев соответствует минимальным добротностям контура, обеспечивающим напряжение пробоя. Практически это достигается плавным увеличением напряжения (настройкой контура) до возникновения пробоя. Для эпоксидных муфт важно доставить наибольшее количество энергии к месту повреждения, что практически обеспечивается увеличением емкости и повышением напряжения разряда.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННОГО МЕТОДА ПРОЖИГАНИЯ ДЕФЕКТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ

Коммутационный метод прожигания дефектной изоляции силовых кабелей разработан автором совместно с В. В. Платоновым. Суть метода состоит в следующем. Источник постоян-

ного тока низкого напряжения присоединяется через реактивную катушку к поврежденной жиле и броне кабеля, параллельно которому включены контакты коммутирующего устройства, периодически прерывающего цепь тока реактивной катушки (рис. 5, а). При замыкании цепи ток в катушке нараста-

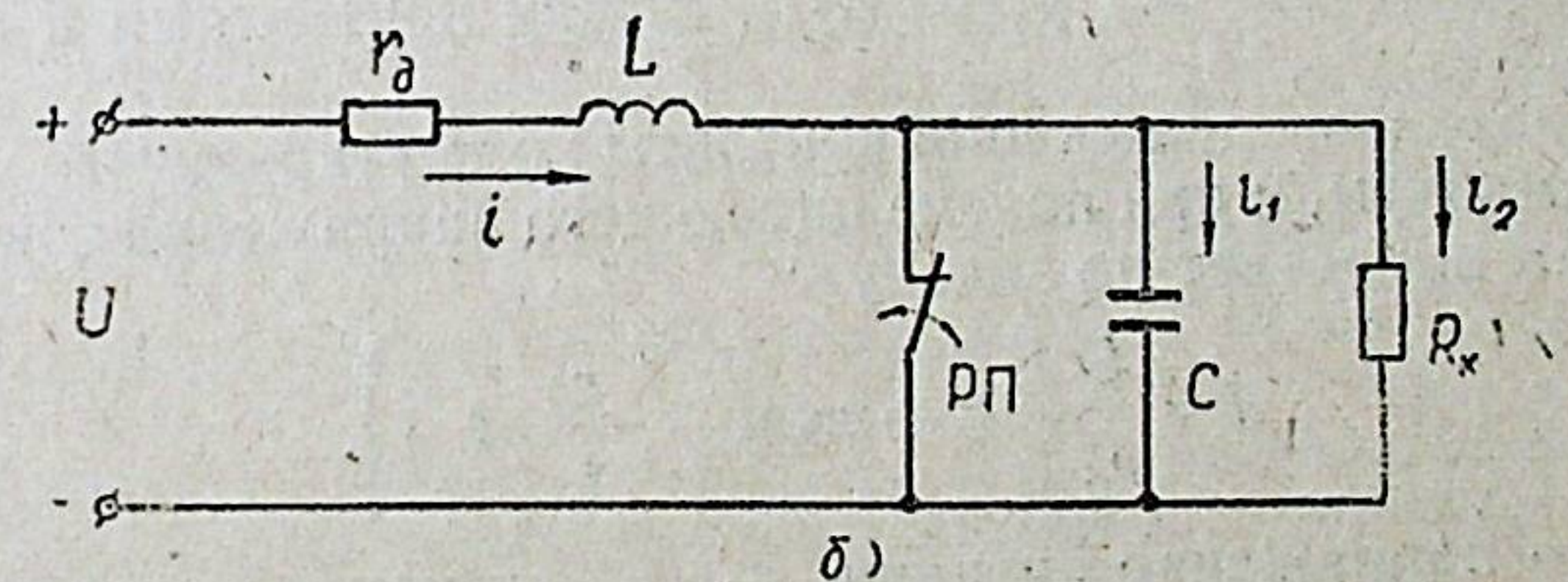
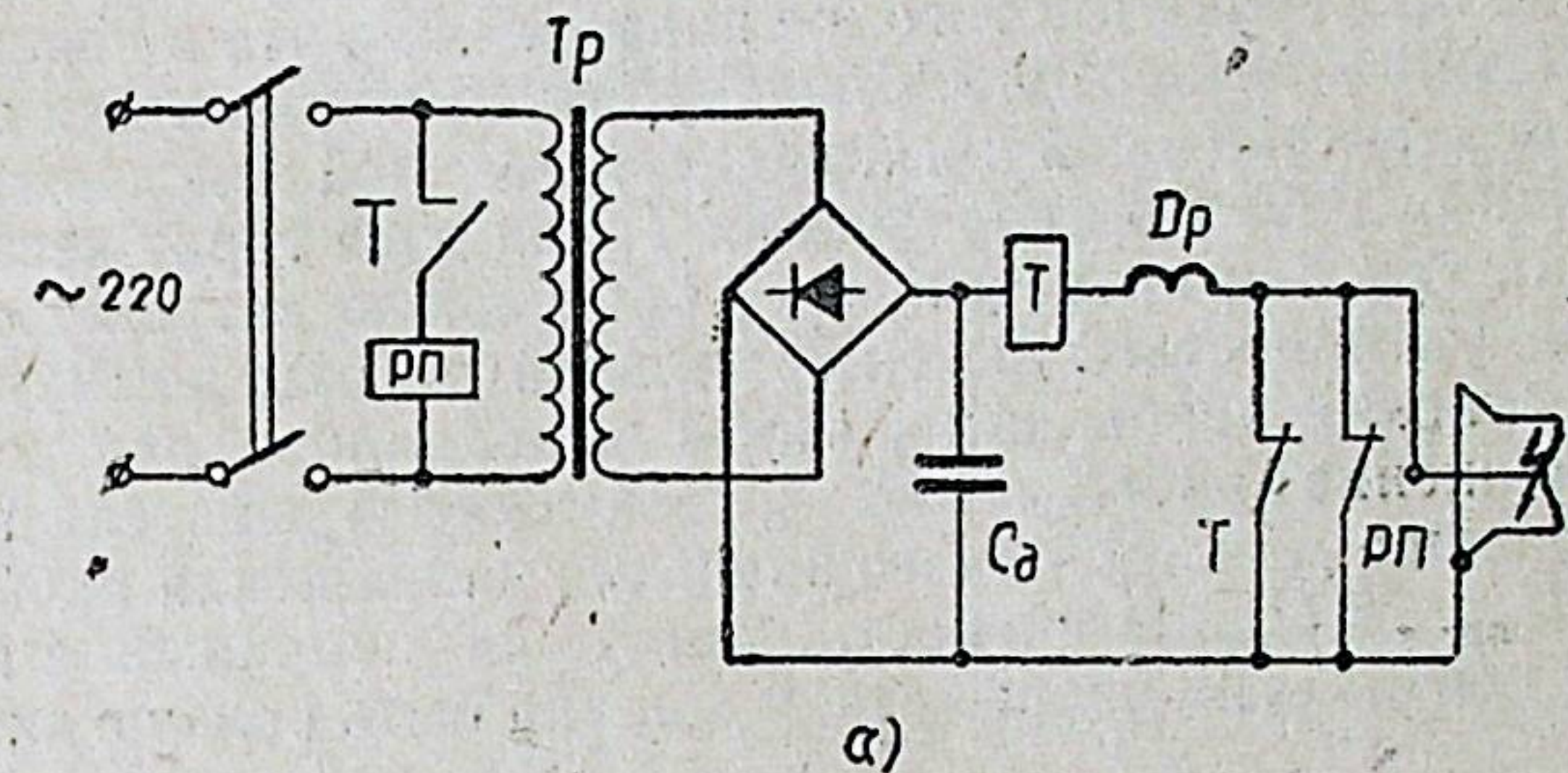


Рис. 5. Коммутационная установка для прожигания кабельной изоляции. а) Принципиальная схема. б) Схема замещения

ет по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\frac{L}{r_a}$

(рис. 5, б). При размыкании контактов в контуре  $r, L, C$  возникают свободные затухающие синусоидальные колебания. При этом на реактивных элементах возбуждается высокое напряжение, которое при соответствующих значениях  $U, r_a, L, C$  будет достаточным для пробоя дефектной изоляции. Если напряжение пробоя кабельной изоляции близко к амплитудному зна-



ется по экспоненциальному закону в соответствии с параметрами кабеля.

$$U_{cm} = U'_{cm} \exp(-0,785 \operatorname{tg} \delta). \quad (10)$$

Анализируя выражение (10), можно сделать заключение о том, что напряжение, возбуждаемое на кабеле, мало зависит от тангенса угла диэлектрических потерь кабельной линии. Так, при  $\operatorname{tg} \delta = 0,2$  получим  $U_{cm} = 0,84 U'_{cm}$ . Этим коммутационная установка выгодно отличается от резонансных устройств для прожигания дефектной изоляции кабелей.

При выборе частоты собственных колебаний коммутационной установки существенным является вопрос о мощности, потребляемой установкой из сети, которая, как ясно из предыдущего материала, расходуется практически на покрытие потерь в меди катушки. Потери в кабеле влияют лишь на скорость затухания колебательного процесса. Для уменьшения потерь частоту собственных колебаний следует выбирать с таким расчетом, чтобы величина тока была минимально допустимой по условиям горения дуги.

Учитывая принятое соотношение между частотой собственных колебаний и показателем затухания, расчет параметров резонансной установки на первом этапе целесообразно производить по соотношению для контура без потерь:  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

$$U_{cm} = \frac{U}{r_0} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (11)$$

Выражение (11) показывает, что если расчет установки произвести для максимального значения емкости ( $C_{\max}$ ), то при полученных значениях  $U$ ,  $r_0$ ,  $L$  более короткие кабели будут успешно прожигаться и регулирования индуктивности не потребуется. Это объясняется тем, что при  $C_k < C_{\max}$  величина возбуждаемого напряжения будет выше, однако оно не превысит напряжения пробоя изоляции в месте повреждения, поскольку волна, набегающая на кабель, имеет весьма положительный фронт, и нарастание напряжения происходит практически одновременно по всей длине кабеля.

Экспериментальные исследования показали хорошее соответствие аналитических расчетов опытным данным. На рис. 6 приведены характерные осциллограммы, полученные при прожигании кабеля, имеющего повреждение жилы на оболочку, которые наглядно иллюстрируют подхват дуги от источ-

ника тока. После многократных пробоев кабеля при снижении

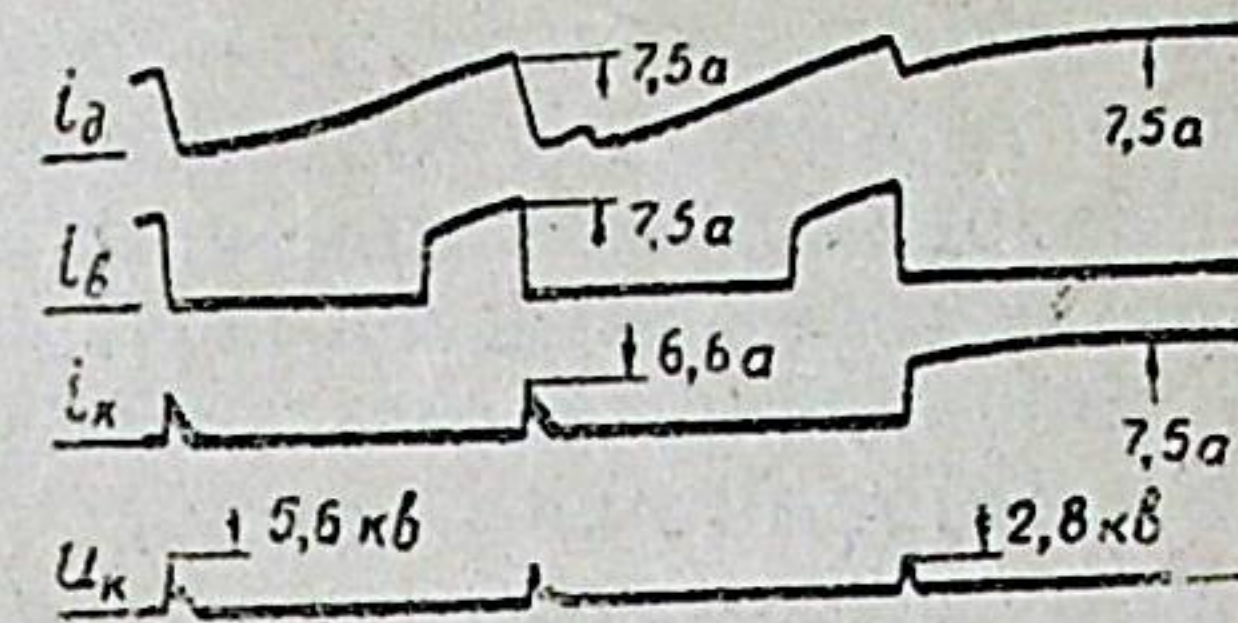


Рис. 6. Характерные осциллограммы токов и напряжений коммутационной установки в режиме прожигания.

напряжения пробоя до 2,8 кв в разрядной цепи установился ток, равный 7,5 а. При этом дуга горела весьма устойчиво.

#### 4. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА, КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ

##### а. Переносный аппарат для испытания изоляции кабелей.

Основным методом профилактики изоляции высоковольтных кабелей в эксплуатации является испытание повышенным напряжением постоянного тока. Применяемые для этих целей выпрямительные установки имеют большой вес и габариты, что создает значительные эксплуатационные неудобства. В Новочеркасском политехническом институте с участием автора разработан малогабаритный переносный аппарат типа ИК, предназначенный для испытания кабелей с номинальным напряжением до 6 кв. включительно [3]. В аппарате применена схема, в которой напряжение постоянного тока блока питания преобразуется генератором в синусоидальное напряжение высокой частоты, повышается до необходимой величины трансформатором, подается на высоковольтный выпрямитель и через сопротивление, предназначенное для ограничения тока заряда и защиты от возможных перенапряжений, поступает на нагрузку.

Генератор высокочастотных колебаний выполнен по схеме с индуктивной обратной связью и автосмещением в цепи сеток на двух тетрадах ГУ-29. Рабочая частота генератора, равная 55 кгц, определяется индуктивностью обмоток трансформатора, его собственной емкостью и входной емкостью высоковольтного выпрямителя, который собран по схеме учетверения на



высоковольтных кенотронах 1Ц 7С. Питание цепей накала кенотронов осуществляется с помощью трансформаторов тока, первичная обмотка которых общая и выполнена в виде петли из высоковольтного кабеля РК-103, питаемой от отдельной обмотки трансформатора блока питания. Замер выходного напряжения в аппарате осуществляется непосредственным измерением высокого напряжения путем подключения к выходу высоковольтного выпрямителя схемы, состоящей из микроамперметра и высоковольтного сопротивления типа КЭВ-35. Аппарат обеспечивает плавное регулирование напряжения от 0 до 40 кв при токе нагрузки до 1,6 ма. Потребляемая мощность — 250 вт, вес аппарата — 15 кг. Предусмотрены устройства защиты для отключения аппарата при перегрузках.

В настоящее время на аналогичном принципе разработан переносный аппарат для испытания кабелей с номинальным напряжением до 10 кв включительно.

б. Резонансная установка для прожигания дефектной изоляции кабелей. Разработанная с участием автора резонансная прожигающая установка [1] состоит из силового трансформатора, высоковольтного регулируемого дросселя, устройств управления и защиты. Основным и наиболее ответственным элементом установки является высоковольтный дроссель, который должен обладать широким диапазоном изменения индуктивности при линейности характеристик, надежностью и простотой системы регулирования индуктивности, а также минимально возможным весом. Существующие устройства, магнитная система которых выполнена в виде двух полустержней, имеют малый диапазон регулирования, а дроссели с Ш-образными сердечниками при тех же габаритах и весе не обеспечивают линейности. Попытка обеспечить линейность за счет увеличения стали сердечников приводит к значительному увеличению веса дросселя. Кроме того, наличие боковых стержней предполагает либо работу дросселя в масле, либо значительное увеличение воздушных промежутков между ними и обмоткой. Последнее влечет за собой дополнительный расход активных материалов.

Разработанная конструкция высоковольтного дросселя [4] удовлетворяет необходимым требованиям. Особенность конструкции состоит в наложении плоских шихтованных магнитопроводов полюсов на внешние торцы частей сердечников, перемещаемых внутри изоляционного цилиндра обмотки дрос-

селя. При принятой конструкции магнитопровода и соотношении геометрических размеров катушки индуктивность дросселя, как показали экспериментальные исследования, увеличивается в 6—7 раз по сравнению с индуктивностью дросселя без сердечника. Для удобства эксплуатации и обеспечения безопасности проведения работ регулирование индуктивности выполнено дистанционным, с помощью реверсивного электродвигателя. Таким образом, резонансная установка с предлагаемым дросселем может быть легко автоматизирована [5, 8].

Исходными данными для расчета установки являются параметры кабельной сети: длина и марка кабелей, по которым определяются емкости  $C_{к.мин}$  и  $C_{к.макс}$ , а также напряжение, требуемое для прожигания  $U_{к.макс}$ . Из условия резонанса определяются пределы регулирования индуктивности дросселя

$$L_{д.макс} \div L_{д.мин} = \frac{1}{\omega^2 (C_{мин} \div C_{к.макс})}$$

где:  $C_{мин} = C_{к.мин} + C_{\sigma}$  — сумма минимальной емкости кабеля и емкости балластного конденсатора.

Величина  $C_{\sigma}$  определяется из условия  $C_{\sigma} = \frac{C_{к.макс} - C_{к.мин}}{3}$ .

Определяется индуктивность обмотки дросселя без сердечника

$$L_0 = \frac{L_{д.макс}}{6 \div 7}$$

Нижний предел индуктивности обеспечивается перемещением сердечника и выполнением обмотки дросселя с отпайками. Находится сечение провода обмотки дросселя

$$q = \frac{U_{к.макс} \omega C_{к.макс}}{\sqrt{2} \delta}$$

где  $\delta = 5-6$  а/мм<sup>2</sup> — расчетная плотность тока.

Для определения числа витков и внешнего диаметра катушки по известной индуктивности и сечению провода на рис. 7 приведены зависимости  $\omega(L_0)$  и  $D_1(\omega)$ . Поперечное сечение стержня сердечника определяется приближенно, при этом предполагается, что весь поток проходит по стержню;

$$q_c = \frac{U_{к.макс}}{\sqrt{2} \cdot 4,44 B_c f \omega}$$



где  $B_c$  — расчетная индукция в стержне дросселя, принимаемая для холоднокатанной стали — 2 тл.

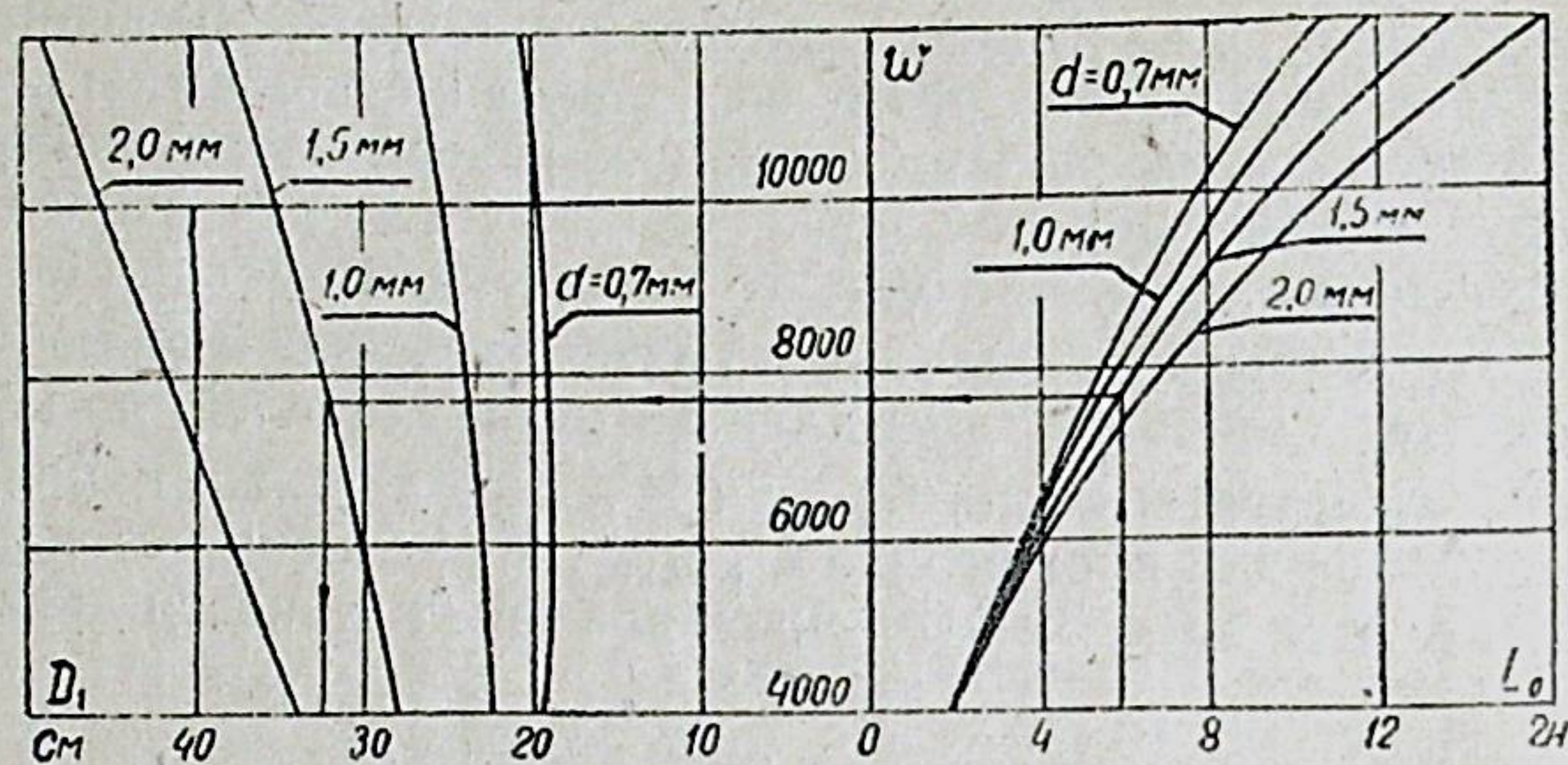


Рис. 7. Номограмма для определения числа витков и внешнего диаметра обмотки дросселя по принятой индуктивности и диаметру обмоточного провода.

Мощность силового трансформатора  $P_T$  выбирается из условия покрытия потерь в резонансном контуре. Вторичное напряжение трансформатора  $U_{2r} = \frac{P_T}{i_2}$ . При расчете трансформатора представляет интерес выбор изоляции обмоток и защита от перенапряжений, возникающих при отключении резонансной установки (рис. 8, а). Максимальное напряжение, возникающее при этом на обмотке, достигает 10 кв и может быть определено как  $U_{tm} = r_c I_m \sin \omega t_s$ , где  $\omega t_s = \arccos \left( 1 - \frac{2B_s}{B_m} \right)$  — момент насыщения стали сердечника.

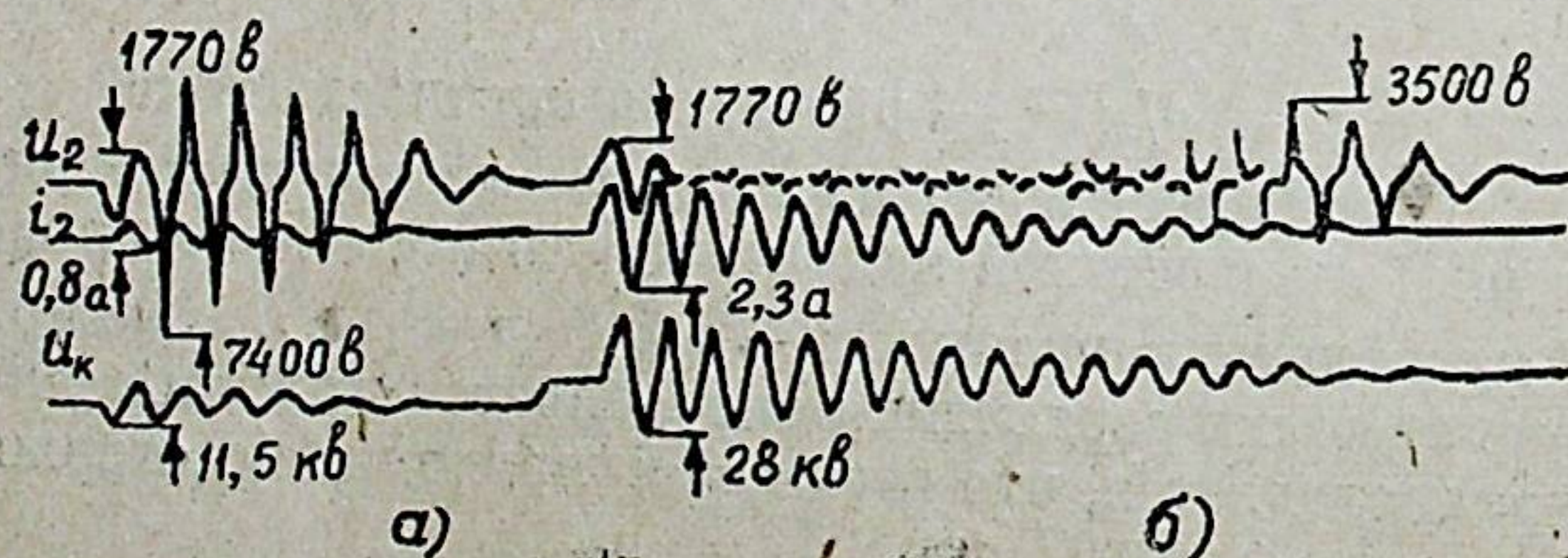


Рис. 8. Характерные осциллограммы токов и напряжений резонансной установки в режиме отключения: а) без разрядника; б) с разрядником.

Для защиты трансформатора от перенапряжений необходимо предусматривать разрядник, при наличии которого амплитуды напряжений срезаются до напряжения пробоя разрядника при любых токах в резонансной цепи (рис. 8б).

в. Результаты промышленного внедрения. Разработанная аппаратура и методы расчетов внедрены на нескольких предприятиях страны. Переносный аппарат для испытания кабелей типа ИК находится в опытной эксплуатации на Новочеркасском электровозостроительном заводе, в Карачаево-Черкесских электрических сетях и на других предприятиях. Разработанная методика расчета серийно выпускаемого трансформатора РА-2, результаты исследований, а также реконструированный образец используются пуско-наладочным управлением треста «Кавэлектромонтаж». Резонансная прожигающая установка с плавно регулируемой индуктивностью эксплуатируется в Карачаево-Черкесских электрических сетях, на Новочеркасском электровозостроительном заводе и в Ростовском монтажно-наладочном управлении треста «Спецэлеватормонтаж». За время эксплуатации не обнаружено каких-либо серьезных дефектов в схеме и конструкции разработанных аппаратов. Они зарекомендовали себя как надежные и удобные устройства.

## ВЫВОДЫ

1. Применяемые в настоящее время для прожигания дефектной изоляции кабелей серийные резонансные трансформаторы типа РА-2 имеют неудовлетворительные электрические и тепловые характеристики. Конструкция характеризуется насыщением магнитной системы в условиях резонанса, высокими плотностями тока и весьма неудовлетворительным охлаждением вторичной обмотки. В работе даны рекомендации по улучшению характеристик существующих конструкций. Разработана методика расчета резонансного трансформатора для определения целесообразных соотношений между количеством витков обмоток и сечением стали сердечника, при которых допустимая длительность включения увеличивается в четыре раза.
2. Аналитическое исследование резонансной цепи высокой добротности позволило обосновать выбор схемы замещения регулируемой резонансной установки и оценить влияние на добротность контура как параметров дросселя, так и параметров внешней цепи (емкости, тангенса угла диэлектрических потерь, переходного сопротивления в месте повреждения). По-



лученные зависимости  $U_{cm}(r_n, \operatorname{tg}\delta, C_k)$  имеют практическое значение.

3. Исследование резонансной установки на АВМ дало возможность выявить характер процессов при переходных и установившихся режимах и оценить влияние различных параметров на процесс прожигания дефектной изоляции. Полученные зависимости числа пробоев от переходного сопротивления и напряжения пробоя позволяют выбрать схему включения установки и наиболее выгодный режим прожигания. Регулируемая резонансная установка может быть использована для испытания высоковольтного оборудования. Биения, возникающие при включении установки, не опасны для изоляции в испытательном режиме.

4. Магнитную систему дросселя целесообразно выполнять в виде Т-образных раздвижных сердечников. Регулирование индуктивности следует выполнять дистанционным. При этом процесс прожигания может быть автоматизирован применением схемы, предложенной автором. Разработанная методика расчета позволяет определять параметры резонансной установки в зависимости от данных кабельной сети.

5. Предложенное устройство, реализующее коммутационный метод прожигания дефектной изоляции силовых кабелей, имеет значительные преимущества по сравнению с известными. Мощность, потребляемая установкой, определяется практически только потерями в меди дросселя, что обуславливает малый вес устройства. Возбуждаемое на кабеле напряжение мало зависит от тангенса угла диэлектрических потерь, емкости и переходного сопротивления в месте повреждения, что позволяет выполнить установки без устройств регулирования. Весь процесс прожигания ведется на постоянном токе с помощью одной установки, с автоматическим изменением режима работы в зависимости от переходного сопротивления в месте повреждения без непосредственного участия персонала.

6. Разработанный аппарат типа ИК пригоден для испытания изоляции кабелей практически любой реальной длины при весе установки в 7—8 раз меньшем по сравнению с промышленными кенотронными установками равного испытательного напряжения.

7. Все разработанные устройства и методы расчетов внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию на нескольких предприятиях и электрических сетях страны. За время эксплуатации в течение 2—3 лет устройства зарекомендовали себя

как надежные и удобные, при этом не обнаружено каких-либо серьезных недостатков в схемах и конструкциях аппаратов.

Основное содержание диссертационной работы освещено в следующих работах:

1. А. А. Сенчуков, В. В. Платонов. Резонансная установка для прожигания силовых кабелей. «Электрические станции», № 3, 1969.
2. А. А. Сенчуков, В. В. Платонов, С. Д. Хлебников. Исследование резонансной установки для прожигания дефектной изоляции силовых кабелей. «Изв. вузов», «Электромеханика» (в печати).
3. А. А. Сенчуков, В. В. Платонов, В. В. Михайлов, В. Б. Галактионов. Переносный аппарат для испытания изоляции кабелей постоянным током высокого напряжения. «Промышленная энергетика», № 1, 1969.
4. А. А. Сенчуков, В. В. Платонов, В. И. Копылов. Высоковольтный дроссель с плавным регулированием индуктивности. Труды НПИ, том 195, изд. НПИ, Новочеркасск, 1969.
5. А. А. Сенчуков. Автоматическая резонансная установка для прожигания дефектной изоляции силовых кабелей. Труды НПИ, том 195, изд. НПИ, Новочеркасск, 1969.
6. А. А. Сенчуков, В. В. Платонов, В. И. Копылов. Анализ способов прожигания и отыскания мест повреждения силовых кабелей. Труды НПИ, том 195, изд. НПИ, Новочеркасск, 1969.
7. А. А. Сенчуков, В. В. Платонов. Устройство для прожигания поврежденного места изоляции электрического кабеля. Решение на выдачу авторского свидетельства от 23.V-1969 по заявке № 1139828/24-7 от 2.III-67 г.
8. А. А. Сенчуков, В. В. Михайлов, В. В. Нечитайлов. Фазоограничивающее реле для повышения чувствительности пусковых органов дистанционных защит. «Электрические станции», № 1, 1965.