

РАСЧЕТ ГАШЕНИЯ ОБРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОЙ СХЕМЕ

И. П. ЧУЧАЛИН, В. М. РАЗИН

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

Введение

В схемах питания генераторов импульсных магнитных полей для создания импульса тока в обмотках электромагнита обычно используется разряд предварительно заряженной батареи конденсаторов. В качестве коммутирующих элементов применяются газоразрядные вентили: игнитроны и тиратроны. Отрицательное напряжение, появляющееся на батарее конденсаторов к концу ее перезаряда, скачком прикладывается к электродам коммутирующего вентиля в момент его зашпираания и может послужить причиной появления обратного зажигания.

Вероятность обратного зажигания можно в значительной степени понизить, если каким-либо путем изменить скорость возрастания обратного напряжения так, чтобы к моменту появления между анодом и катодом напряжения, достаточного для пробоя, процесс рекомбинации ионов практически закончился.

Явление обратного зажигания можно устранить, если предотвратить появление высокого обратного напряжения или ограничить его величину.

При импульсном режиме работы с достаточно большой скважностью обратное напряжение, появляющееся на основном вентиле, можно уменьшить или полностью предотвратить с помощью дополнительного вентиля. Дополнительный вентиль, соединенный последовательно с активным сопротивлением, включается параллельно конденсаторной батарее.

В настоящей работе производится математический анализ происходящих в рассматриваемой схеме гашения переходных процессов и приводятся экспериментальные данные, полученные при исследовании работы схемы.

На основе сделанного анализа даются указания по выбору параметров схемы гашения.

Схема гашения обратного напряжения

В импульсных схемах питания электромагнитов разрядный контур обычно состоит из емкости C , индуктивности L (обмотки электромагнита) и коммутирующего вентиля (игнитрон, тиратрон—рис. 1).

В момент отпираания коммутирующего вентиля предварительно заряженная емкость C начинает разряжаться, создавая в витках обмотки L импульс тока.

В течение времени, пока коммутирующий ventиль проводит ток, напряжение между его электродами равно падению напряжения в дуге. Падение напряжения в дуге или внутреннее падение напряжения у игнитронов и тиратронов достигает величины не более 20—25 в.

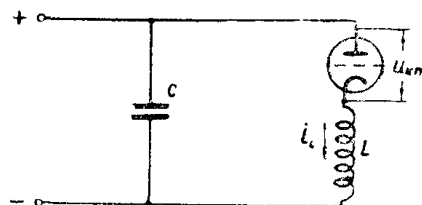


Рис. 1. Импульсная схема питания электромагнита.

В момент прохождения тока i_L через ноль, т. е. в момент закрывания коммутирующего ventиля, последний оказывается под обратным напряжением, которое нарастает скачком. Практически обратное напряжение нарастает с большой скоростью, но не мгновенно, так как распределенные емкости катушки индуктивности и междуэлектродные емкости ventиля задерживают его нарастание [1].

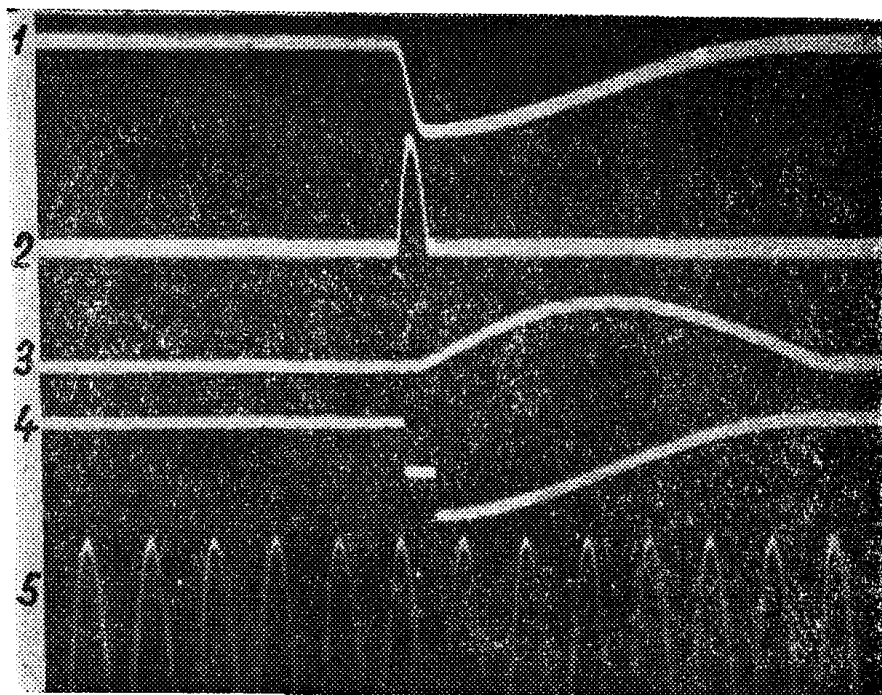


Рис. 2. Осциллограмма токов и напряжений в импульсной схеме
1 — напряжение на емкости, 2 — ток в обмотке электромагнита,
3 — ток в зарядной цепи, 4 — напряжение на ventиле, 5 — градуировочное напряжение 50 в.

На рис. 2 представлена осциллограмма, на которой изображены кривые напряжения на емкости, тока в катушке индуктивности, тока в зарядном контуре и напряжения между электродами ventиля.

Если в разрядный контур включить дополнительный ventиль 2 (рис. 3) с активным сопротивлением R и поджигать его в момент, когда ток i_L проходит через максимальное значение или несколько позже, то, в зависимости от величины сопротивления R , обратное напряжение на ventиле 1 будет полностью или частично погашено вследствие рассеяния в активном сопротивлении R энергии колебательного контура.

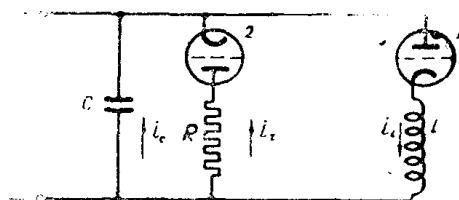


Рис. 3. Схема гашения обратного напряжения.

Изменяя величину сопротивления R , можно изменять величину тока i_L (рис. 3) и, следовательно, степень перезарядки емкости C , т. е. величину отрицательного напряжения U_c .

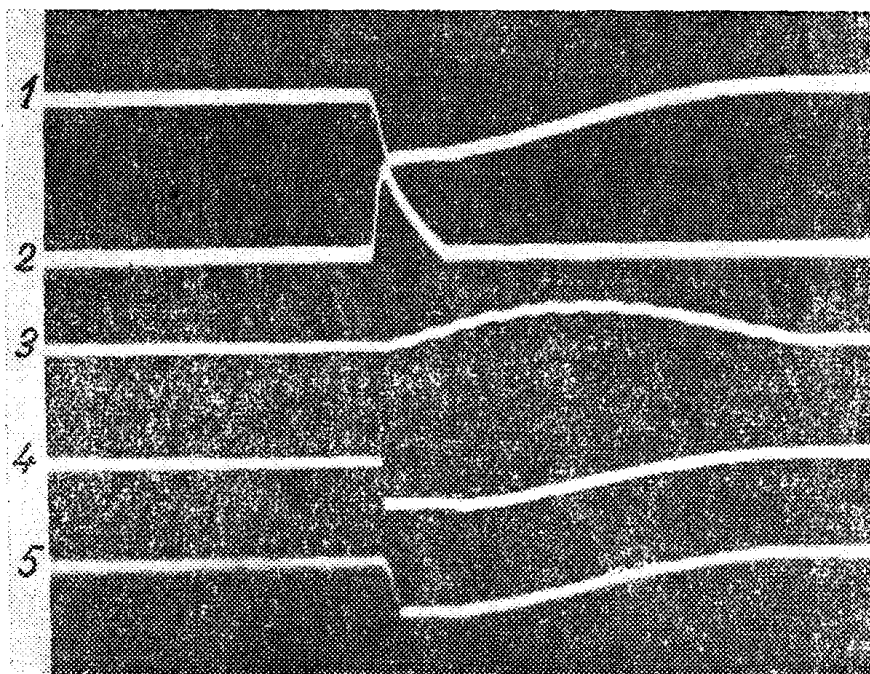


Рис. 4. Осциллограмма токов и напряжений в случае полного гашения обратного напряжения.

1 — напряжение на емкости, 2 — ток в обмотке электромагнита, 3 — ток в зарядной цепи, 4 — напряжение на основном ventиле 1, 5 — напряжение на дополнительном ventиле 2.

На рис. 4 приведены осциллограммы для случая, когда обратное напряжение на ventилях не возникает. Это видно из того, что осциллограммы напряжения на электродах ventилей после их запираания не имеют скачка напряжения. На дополнительном ventиле обратное напряжение существует тогда, когда знак напряжения на емкости положительный. Это

обратное напряжение для дополнительного вентиля не опасно, так как в его междуэлектродном пространстве в это время нет ионов.

На рис. 5 представлены осциллограммы при частичном гашении обратного напряжения на основном вентиле.

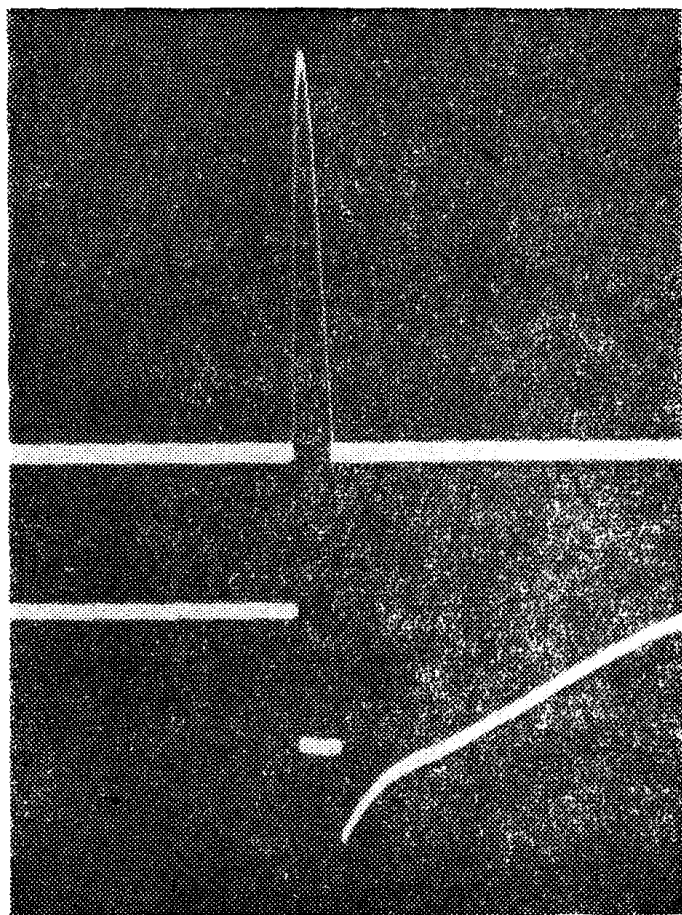


Рис. 5. Осциллограмма токов и напряжений при частичном гашении обратного напряжения.

Теория и расчет схемы гашения

Для математического анализа схему, изображенную на рис. 3, можно заменить эквивалентной схемой рис. 6.

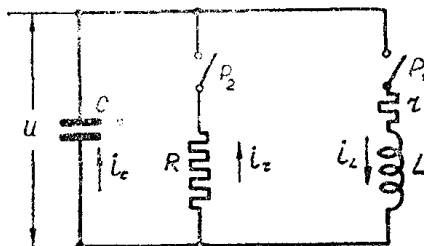


Рис. 6. Эквивалентная расчетная схема.

Конденсатор C заряжен до напряжения U_{mo} . В момент времени $t=0$ замыкается рубильник P_1 и конденсатор начинает разряжаться через r и L , при этом изменения тока i_L и напряжения U_c определяются выражениями [2]:

$$i_L = i_c = \frac{U_{mo}}{\omega^1 L} \cdot \sin \omega^1 t \cdot e^{-\delta t}, \quad (1)$$

$$U_c = \frac{U_{mo}}{\omega^1 \sqrt{LC}} \cdot \sin \left(\omega^1 t - \frac{\pi}{2} - \xi \right) e^{-\delta t}, \quad (2)$$

где $\xi = \frac{r}{2L}$,

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — угловая частота собственных незатухающих колебаний разрядного контура,

$\omega^1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — угловая частота собственных затухающих колебаний разрядного контура,

$$\xi = \arctg \frac{\delta}{\omega^1}.$$

В момент времени, когда напряжение U_c равно нулю, замыкается рубильник P_2 . Найдем величину тока I_L в момент замыкания рубильника P_2 . Для этого приравняем нулю выражение (2) и определим время t , по прошествии которого U_c уменьшится до нуля:

$$t = \frac{\xi + \frac{\pi}{2}}{\omega^1}. \quad (3)$$

Подставим полученное выражение в (1) и найдем значение тока I_L в момент замыкания рубильника P_2 :

$$I_L = \frac{U_{mo}}{\omega^1 L} \cdot \sin \left(\xi + \frac{\pi}{2} \right) \cdot e^{-\frac{\delta}{\omega^1} \left(\xi + \frac{\pi}{2} \right)}. \quad (4)$$

Далее нас будут интересовать процессы, происходящие в цепи после замыкания рубильника P_2 , т. е. после включения вентиля 2.

Исходные уравнения в этом случае будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{C} \int i_c dt + L \frac{di_L}{dt} + r i_L &= 0 \\ i_r R + L \frac{di_L}{dt} + r i_L &= 0 \\ i_L &= i_r + i_c \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Из последних уравнений системы (5) имеем:

$$i_c = \left(1 + \frac{r}{R} \right) i_L + \frac{L}{R} \frac{di_L}{dt}.$$

Подставим полученное выражение в первое уравнение системы (5) и после простых преобразований получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right) \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right) i_L = 0. \quad (6)$$

Характер происходящих в цепи процессов зависит от соотношения параметров r , R , L и C и, в конечном счете, определяется тем, будут ли

корни характеристического уравнения вещественными или комплексными. Условие апериодического разряда

$$\frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2 \geq \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right).$$

Рассмотрим случай, когда $\frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2 > \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right)$.

Решение дифференциального уравнения (6) в этом случае будет иметь вид:

$$i_L = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}. \quad (7)$$

Пользуясь начальными условиями

$$\left. \begin{aligned} i_L(t)_{t=0} &= C_1 + C_2 = I_L \\ u_C(t)_{t=0} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

находя и подставляя постоянные интегрирования в (7), получим

$$i_L = \frac{I_L}{L(p_1 - p_2)} \left[(Lp_1 + r) e^{-p_2 t} - (Lp_2 + r) e^{p_1 t} \right]. \quad (9)$$

Напряжение на емкости:

$$U_C = \frac{I_L (Lp_1 + r)(Lp_2 + r)}{L(p_1 - p_2)} \left(e^{p_1 t} - e^{p_2 t} \right). \quad (10)$$

Перейдем к рассмотрению процессов, происходящих в разрядном контуре при $\frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2 < \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right)$.

В этом случае корни характеристического уравнения будут комплексные:

$$\begin{aligned} p_1 &= \alpha + \beta i, \\ p_2 &= \alpha - \beta i, \end{aligned}$$

где

$$\alpha = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right),$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2}.$$

Решение дифференциального уравнения (6) будет иметь вид:

$$i_L = (C_3 \cos \beta t + C_4 \sin \beta t) e^{\alpha t}. \quad (11)$$

Определяя из начальных условий постоянные C_3 и C_4 , получим:

$$i_L = I_L \left[\cos \beta t - \left(\frac{r + \alpha L}{\beta L} \right) \sin \beta t \right] \cdot e^{\alpha t}. \quad (12)$$

Напряжение на обкладках конденсатора

$$U_c = I_L L \beta \left[1 + \left(\frac{r + \alpha L}{\beta L} \right)^2 \right] \sin \beta t \cdot e^{-\alpha t}. \quad (13)$$

При апериодическом разряде конденсатора ток к нулю приближается асимптотически. На основном вентиле 1 обратное напряжение не появляется (рис. 4).

В случае колебательного разряда к моменту прохождения током нулевого значения конденсатор не успевает полностью разрядиться и оставшееся на нем отрицательное напряжение прикладывается к вентилю 1 (рис. 5).

Определим величину обратного напряжения. Для этого приравняем нулю выражение (12) и найдем момент времени t , когда ток i_L проходит через нулевое значение:

$$t = \frac{1}{\beta} \left(\pi - \operatorname{arctg} \left| \frac{\beta L}{r + \alpha L} \right| \right). \quad (1)$$

Подставим найденное значение в выражение (13) и определим величину обратного напряжения:

$$U_{обр} = I_L \sqrt{(r + \alpha L)^2 + \beta^2 L^2} \cdot e^{-\frac{\alpha}{\beta} \left(\pi - \operatorname{arctg} \left| \frac{\beta L}{r + \alpha L} \right| \right)}. \quad (14)$$

Подставив в (14) значение I_L из (4), получим:

$$U_{обр} = U_{mo} e^{-\frac{\alpha}{\beta} \left(\pi - \operatorname{arctg} \left| \frac{\beta L}{r + \alpha L} \right| \right) - \frac{\delta}{\omega^1} \left(\operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega^1} + \frac{\pi}{2} \right)}. \quad (15)$$

Отношение обратного напряжения к начальному напряжению на электродах вентилей 1:

$$\frac{U_{обр}}{U_{mo}} = e^{-\frac{\alpha}{\beta} \left(\pi - \operatorname{arctg} \left| \frac{\beta L}{r + \alpha L} \right| \right) - \frac{\delta}{\omega^1} \left(\operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega^1} + \frac{\pi}{2} \right)}. \quad (16)$$

Если учесть, что $\delta = \frac{r}{2L}$ и $\omega^1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$, то отношение $\frac{\delta}{\omega^1}$ можно

привести к виду: $\frac{\delta}{\omega^1} = \frac{1}{\sqrt{4Q^2 - 1}}$, где $Q = \frac{\omega_0 L}{r}$ — добротность раз-

рядного контура.

Тогда формула (16) может быть записана:

$$\frac{U_{обр}}{U_{mo}} = e^{-\frac{\alpha}{\beta} \left(\pi - \operatorname{arctg} \left| \frac{\beta L}{r + \alpha L} \right| \right) - \frac{1}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{4Q^2 - 1}} + \frac{\pi}{2} \right)}. \quad (17)$$

Член $\frac{\beta L}{r + \alpha L}$ можно приближенно записать

$$\frac{\beta L}{r + \alpha L} \approx \frac{\beta}{\alpha}. \quad (18)$$

¹⁾ Прямые скобки означают абсолютное значение дроби.

Указанное приближение оправдывается, так как практически в используемых схемах

$$r \ll \alpha L.$$

При добротности разрядного контура $Q > 5$ можно приближенно, с точностью до 1%, записать:

$$\frac{\delta}{\omega^1} \cong \frac{1}{2Q}. \quad (19)$$

Учитывая приближения (18) и (19), формулу (17) можно представить в таком виде:

$$\frac{U_{обр}}{U_{mo}} \cong e^{\frac{\alpha}{\beta} \left(\pi - \operatorname{arctg} \frac{\beta}{L} \right) - \frac{1}{2Q} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{2Q} + \frac{\pi}{2} \right)}.$$

Введем обозначение:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2}{\frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right)}} = \sqrt{\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2}}. \quad (20)$$

Окончательно выражение (17) можно записать:

$$\frac{U_{обр.}}{U_{mo}} \cong K_1 \cdot K_2. \quad (21)$$

где

$$K_1 = e^{-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \left(\pi - \arccos \gamma \right)}, \quad (22)$$

$$K_2 = e^{-\frac{1}{2Q} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{2Q} + \frac{\pi}{2} \right)}. \quad (23)$$

Зависимость $K_1 = f_1(\gamma)$ приведена графически на рис. 7. На рис. 8 представлена зависимость $K_2 = f_2(Q)$. Значения K_2 при $Q = 1, 2, 3, 4, 5$ подсчитаны по формуле:

$$K_2 = e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q^2-1}} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{4Q^2-1}} + \frac{\pi}{2} \right)},$$

а K_2 при $Q > 5$ по формуле:

$$K_2 \cong e^{-\frac{1}{2Q} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{2Q} + \frac{\pi}{2} \right)}.$$

При колебательном разряде конденсатора, задаваясь величиной сопротивления R в пределах соблюдения условия колебательного разряда, т. е.

$$\frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2 < \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right),$$

можно, пользуясь графиками рис. 7 и 8, для контура с известной добротностью определить отношение $\frac{U_{обр.}}{U_{mo}}$.

На практике часто приходится решать обратную задачу, а именно: выбрав для данного газоразрядного вентиля отношение $\frac{U_{обр.}}{U_{то}}$, требуется найти величину сопротивления R , соединенного последовательно с дополнительным вентилем. Ниже указан путь решения такой задачи.

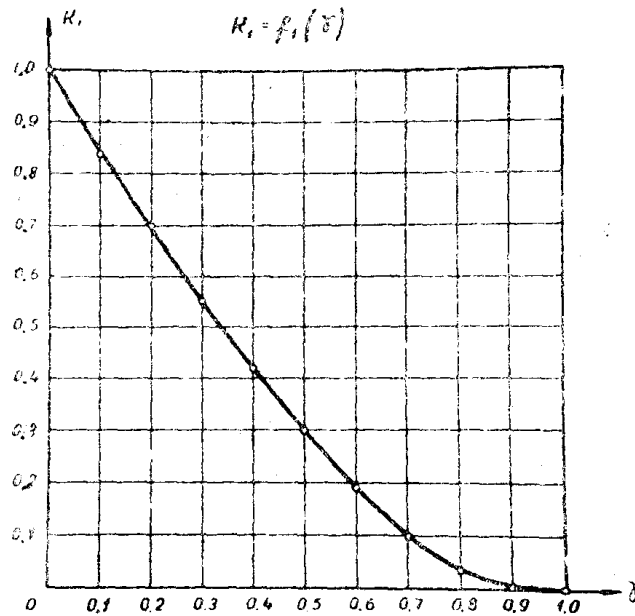


Рис. 7. График зависимости $K_1 = f_1(\gamma)$.

1. Зная добротность разрядного контура, определяем коэффициент K_2 по графику $K_2 = f_2(Q)$ (рис. 8).

2. Выбрав отношение $\frac{U_{обр.}}{U_{то}}$, определяем коэффициент K_1 по формуле $K_1 = \frac{U_{обр.}}{U_{то}} \cdot \frac{1}{K_2}$.

3. Зная K_1 , по графику $K_1 = f_1(\gamma)$ (рис. 7) определяем γ .

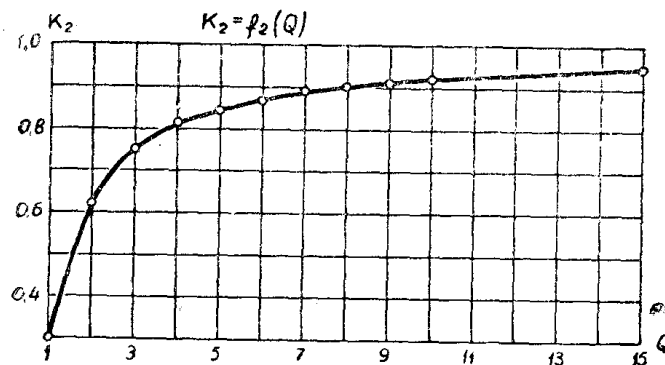


Рис. 8. График зависимости $K_2 = f_2(Q)$.

4. И окончательно зная γ , подсчитаем величину сопротивления R по формуле:

$$R = \frac{1}{4\gamma^2 - r^2} \frac{C}{L} \left\{ r(1 - 2\gamma^2) + \gamma \sqrt{2 \left[(2\gamma^2 - 1)r^2 + 2 \frac{L}{C} \right]} \right\} \quad (2+)$$

Формула (24) получена из выражения (20). При решении квадратного уравнения относительно R корень со знаком минус не учитывается, так как отрицательное значение сопротивления не имеет физического смысла.

5. Рассеиваемая в сопротивлении R мощность может быть подсчитана, с некоторым расчетным запасом, из приближенного выражения

$$P \cong f \frac{CU_{m0}^2}{2}, \quad (25)$$

где f — частота повторения импульсов.

Последнее уравнение написано в предположении, что вся энергия рассеивается только в сопротивлении R . В действительности часть энергии рассеивается в других элементах разрядного контура, и фактическая мощность рассеяния в сопротивлении R будет несколько меньше величины, подсчитанной из выражения (25).

Результаты экспериментальных исследований

Исследования гашения обратного напряжения проводились в схеме с применением в качестве вентилях игнитронов И-100/1000. Сравнение расчетных кривых переходного процесса для частных случаев с полученными из опыта на осциллограммах рис. 9 (апериодический процесс) и рис. 10

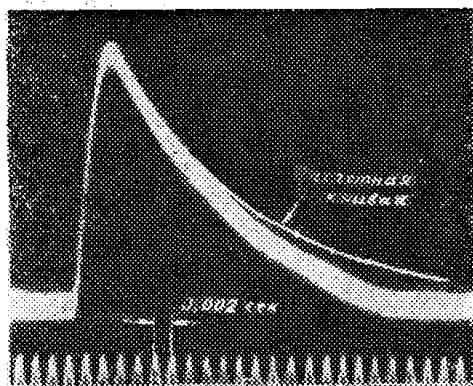


Рис. 9. Осциллограмма тока в обмотке электромагнита при апериодическом процессе.

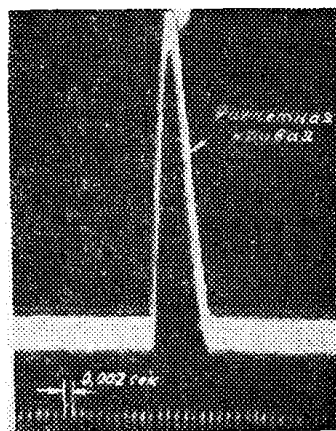


Рис. 10. Осциллограмма тока в обмотке электромагнита при колебательном процессе.

(колебательный процесс) указывает на удовлетворительную точность теоретических расчетов. Увеличение расхождения кривых при уменьшении тока объясняется влиянием нелинейности сопротивления игнитрона. С уменьшением тока эквивалентное сопротивление игнитрона постоянному току возрастает, и действительный переходный процесс заканчивается раньше расчетного (превращаясь в самом конце из апериодического в колебательный, как это видно из осциллограмм рис. 4 и 9).

На рис. 11 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости $\frac{U_{обр}}{U_{m0}} = f_3(\gamma)$ для частного случая $Q=11$. Хорошее совпадение кривых подтверждает справедливость полученных выше расчетных соотношений.

В заключение отметим, что рассматриваемый метод гашения напряжения может найти успешное применение в таких импульсных схемах, где значительные потери энергии, свойственные этому методу, не имеют

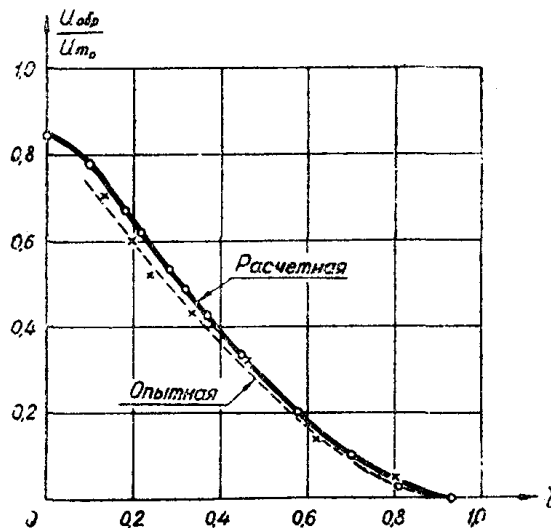


Рис. 11. Теоретические и экспериментальные данные по определению относительной величины обратного напряжения.

существенного значения и где имеется необходимость в повышении напряжения выше паспортных данных используемых вентиляей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстов Ю. Г. Электромагнитные процессы в выпрямительных установках с нелинейными анодными дросселями, Известия АН СССР, отд. техн. наук, № 2, 1950.
2. П. Л. Калантаров, Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники, ГЭИ, 1951.