

15
И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 77 - 110

С.Б.Вассерман

ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛА В ВЫСОКО -
ВОЛЬТНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕН -
НЫХ ЧАСТИЦ

Новосибирск

1977

15
И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 77 - 110

С.Б.Вассерман

ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛА В ВЫСОКО -
ВОЛЬТНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕН -
НЫХ ЧАСТИЦ

Новосибирск

1977

С. Б. Вассерман

ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛА В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Режимы работы и характеристики (теория)

А Н Н О Т А Ц И Я

Приводится краткий обзор развития высоковольтных импульсных ускорителей заряженных частиц, в которых источником высокого напряжения является трансформатор Тесла. Рассматриваются процессы в контурах трансформатора без нагрузки (ч. I) и при различных видах нагрузки, характерных для ускорителей этого типа (ч. II). Приводятся и анализируются расчетные характеристики трансформатора. Даются рекомендации по выбору параметров трансформатора.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
В В Е Д Е Н И Е.....	3
I. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА БЕЗ НАГРУЗКИ.....	6
Напряжения и токи в контурах. Коэффициент связи....	6
Передача энергии из первичного контура во вто- ричный.....	12
II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА С НАГРУЗКОЙ....	18
Ток нагрузки малой длительности.....	18
Прямоугольный импульс тока нагрузки.....	19
Диодный режим.....	37
Л И Т Е Р А Т У Р А.....	41

В В Е Д Е Н И Е

Трансформатор Тесла – система двух индуктивно связанных колебательных контуров с равными собственными частотами, работающая в режиме свободных колебаний, – преобразует относительно низкое постоянное или квазипостоянное напряжение источника питания в высокое импульсное^{*)}. Этот весьма простой способ формирования высоковольтных импульсов нашел применение в технике высоких напряжений, ускорительной технике и некоторых других областях.

Высоковольтные трансформаторы Тесла на напряжение порядка 1 МВ были построены в довоенные годы рядом высоковольтных лабораторий для испытаний изоляционных конструкций /1/. В дальнейшем, в частности, в связи с введением стандартной формы испытательных импульсов для этих целей в основном стали применяться импульсные генераторы других типов. Однако, эпизодические разработки высоковольтных трансформаторов Тесла велись. Отметим, две такие работы. Воздушный трансформатор на напряжение 1,5 МВ описан в /2/. Там же рассмотрено влияние величины коэффициента связи контуров на коэффициент передачи энергии из емкости первичного контура трансформатора в емкость вторичного контура. Оригинальная конструкция трансформатора Тесла на напряжение 1 МВ, созданного для изучения импульсной электрической прочности воды и экспериментов со взрывающимися проволочками, описана в /3/.

Первый ускоритель заряженных частиц на основе трансформатора Тесла для исследований в области ядерной физики был создан в США в начале 30-х годов /4,5/. Ускоритель помещался в бак, заполненный маслом. К вакуумной трубке прикладывалось напряжение около 1 МВ. Ускорители этого типа были построены в некоторыми физическими лабораториями в СССР /6,7/. Разрабатывались также источники рентгеновского излучения на основе трансформатора Тесла для прикладных целей /8/.

^{*)} Следует отметить, что сложившийся исторически термин "трансформатор Тесла" не совсем точно отражает сущность системы, которая помимо трансформации напряжения сама осуществляет формирование импульса напряжения присущей этой системе формы.

В те годы, однако, заметного развития ускорители этой системы не получили, а после 30-х годов они не строились в течение нескольких десятилетий, по-видимому, вообще.

В 1965 году в Институте ядерной физики СО АН СССР (Новосибирск) на основе новых предложений /9/ была начата разработка высоковольтных ускорителей электронов на основе трансформатора Тесла для различных экспериментальных целей. Разработанная конструкция обеспечила достаточно сильную связь контуров трансформатора без использования железного сердечника, стойкость высоковольтной обмотки к электрическим пробоям в системе /10/, компактность ускорителя и простоту в изготовлении. Электрическая схема ускорителя обеспечила управление током электронного пучка и режимом первичного контура трансформатора, возможность получения высокого к.п.д. установки в различных режимах.

В 1966 году был построен первый ускоритель электронов ЭЛИТ-I /11-13/ на энергию 1 МэВ, импульсную мощность 20 МВт и среднюю мощность 500 Вт. Несколько таких ускорителей было изготовлено для различных лабораторий страны и ГДР.

В Институте ядерной физики разработано еще несколько модификаций высоковольтных импульсных ускорителей на энергии 0,5-2,5 МэВ, импульсные мощности до 150 МВт, средние мощности до 10 кВт /14,15/. Ускорители используются в качестве инжекторов электронов циклических ускорителей, для инжекции электронного пучка в ВЧ-генератор типа "Тирокоп" /16/ и для других экспериментальных, а также - различных прикладных целей. Ведутся разработки ускорителей на существенно более высокие импульсные и средние мощности.

В 1969 году в Институте был запущен сильноточный импульсный наносекундный генератор мощных рентгеновских вспышек и электронных пучков с высоковольтным разрядником - обострителем РИУС-5 /17/ с предельными параметрами пучка: энергия - 4 МэВ, ток - 30 кА при длительности импульса - 50 нсек. Заряд высоковольтной емкости в ускорителе такого типа впервые был осуществлен также от трансформатора Тесла. Несколько ускорителей РИУС-5 изготовлено для других организаций страны.

Эксперименты по нагреву плазмы релятивистским электронным пучком ведутся в Институте с помощью созданных здесь же еще не-

скольких модификаций наносекундных ускорителей интенсивных электронных пучков на основе трансформатора Тесла-РИУС-I /18/ и "Водяной" /19/ с параметрами пучка: энергия - 1 МэВ, ток - 10 кА и энергия 1 МэВ, ток - 110 кА соответственно. В последнем ускорителе в качестве диэлектрика в высоковольтном накопителе энергии используется дистиллированная вода. Во всех остальных упомянутых выше установках в качестве высоковольтной изоляции используется сжатый газ (SF_6 и N_2).

В последние годы ускорители на основе трансформатора Тесла строятся и другими организациями страны /20-21/, а также - за рубежом /22-24/.

Можно ожидать, что высоковольтные ускорители на основе трансформатора Тесла будут разрабатываться и применяться для разнообразных экспериментальных и прикладных целей и дальше. Это делает необходимым рассмотрение различных вопросов проектирования и работы ускорителей этого типа. Вся дальнейшая часть настоящей работы посвящена одному из таких вопросов - рассмотрению характеристик трансформатора Тесла - генератора высокого напряжения.

I. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА БЕЗ НАГРУЗКИ

Напряжения и токи в контурах. Коэффициент связи

Схема трансформатора Тесла приведена на рис. I. В общем случае в режиме свободных колебаний (клуч K_2 - разомкнут) напряже-

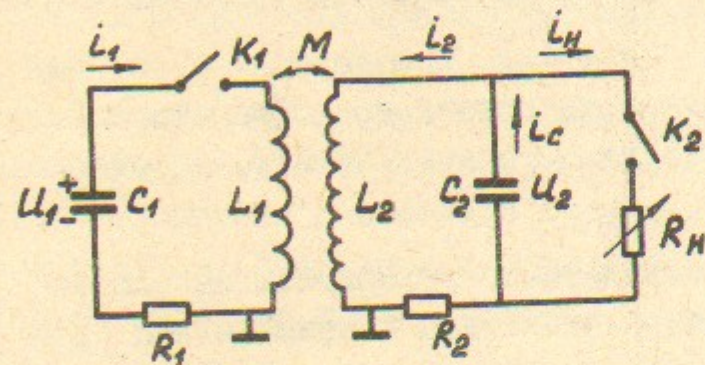


Рис. I. Схема трансформатора Тесла.

R_H - эквивалентное сопротивление нагрузки вторичного контура.

ния на емкостях C_I и C_2 описываются дифференциальными уравнениями

$$U_1 + R_1 C_1 \frac{dU_1}{dt} + L_1 C_1 \frac{d^2 U_1}{dt^2} + M C_2 \frac{d^2 U_2}{dt^2} = 0, \quad (I-1)$$

$$U_2 + R_2 C_2 \frac{dU_2}{dt} + L_2 C_2 \frac{d^2 U_2}{dt^2} + M C_1 \frac{d^2 U_1}{dt^2} = 0. \quad (I-2)$$

Начальные условия определяются значениями напряжений и токов в контурах в момент $t=0$. В случае, когда выполняются условия

$$L_1 C_1 = L_2 C_2, \quad (I-3)$$

$$R_1 \ll \sqrt{L_1/C_1} \text{ и } R_2 \ll \sqrt{L_2/C_2} \quad (I-4)$$

и при равенстве добротностей обоих контуров решение имеет вид:

$$U_1 = \frac{U_{10}}{2} (e^{-\delta_I t} \cos \omega_I t + e^{-\delta_{II} t} \cos \omega_{II} t), \quad (I-5)$$

$$U_2 = \frac{U_{10}}{2} \sqrt{L_2/L_1} (e^{-\delta_I t} \cos \omega_I t - e^{-\delta_{II} t} \cos \omega_{II} t), \quad (I-6)$$

если до замыкания ключа K_I в момент $t=0$ на емкости C_I было напряжение U_{10} , а напряжение на емкости и ток во вторичном контуре были нулевыми. В выражениях (I-5) и (I-6)

$$\omega_I = \omega_0 / \sqrt{1+k} \text{ и } \omega_{II} = \omega_0 / \sqrt{1-k}, \quad (I-7)$$

причем $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ - собственная круговая частота каждого из контуров; $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ - коэффициент индуктивной связи контуров;*

$$\delta_I = \delta / (1+k) \text{ и } \delta_{II} = \delta / (1-k) \quad (I-8)$$

коэффициенты затухания соответствующей гармонике, причем $\delta = R_1/2L_1 = R_2/2L_2$ - коэффициент затухания колебаний для каждого из контуров в отдельности (добротности и собственные частоты контуров одинаковы). Ход решения системы уравнений (I-1) и (I-2) можно найти в курсах радиотехники (см., например, /25/). Следует отметить, что в радиотехнике термин "трансформатор Тесла" обычно не применяется, так как использование свободных колебаний в связанных контурах не преследовало целей получения высокого напряжения.

Влияние затухания колебаний в контурах на характеристики трансформатора Тесла рассматриваются ниже, а пока будем считать, что $R_1 = R_2 = 0$. В этом случае для напряжений и токов имеем зависимости

$$U_1 = \frac{U_{10}}{2} (\cos \omega_I t + \cos \omega_{II} t), \quad (I-9)$$

$$U_2 = \frac{U_{10}}{2} \sqrt{L_2/L_1} (\cos \omega_I t - \cos \omega_{II} t), \quad (I-10)$$

$$i_1 = -C_1 \frac{dU_1}{dt} = \frac{C_1 U_{10}}{2} (\omega_I \sin \omega_I t + \omega_{II} \sin \omega_{II} t), \quad (I-11)$$

$$i_2 = -C_2 \frac{dU_2}{dt} = \frac{C_2 U_{10}}{2} \sqrt{L_2/L_1} (\omega_I \sin \omega_I t - \omega_{II} \sin \omega_{II} t). \quad (I-12)$$

Знаки для токов взяты в соответствии с принятыми для них положительными направлениями на рис. I.

Зависимости (I-9) и (I-10) могут быть также записаны в виде:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_{10} \cos \delta \delta t \cdot \cos \delta \delta t, \\ U_2 &= U_{10} \sqrt{L_2/L_1} \sin \delta \delta t \cdot \sin \delta \delta t, \end{aligned} \right\} \quad (I-13)$$

* В качестве L_1 и L_2 берутся полные индуктивности контуров, т.е. кроме индуктивностей обмоток трансформатора, учитываются все паразитные индуктивности.

где

$$\Omega_{\delta} = \frac{\omega_{II} - \omega_I}{2} \quad \text{и} \quad \Omega_{cb} = \frac{\omega_I + \omega_{II}}{2}. \quad (I-14)$$

Как видно из последних уравнений, в связанных контурах в режиме свободных колебаний происходят колебания напряжений с частотой Ω_{cb} , амплитуда которых меняется по гармоническому закону с частотой Ω_{δ} с образованием биений (рис.2). Один цикл биений составляет половину периода огибающей. Количество колебаний в течение одного периода биений зависит от соотношения частот Ω_{cb} и Ω_{δ} , определяемое величиной коэффициента связи k . Количество колебаний и время достижения максимального напряжения при заданном ω_0 увеличиваются при уменьшении k .

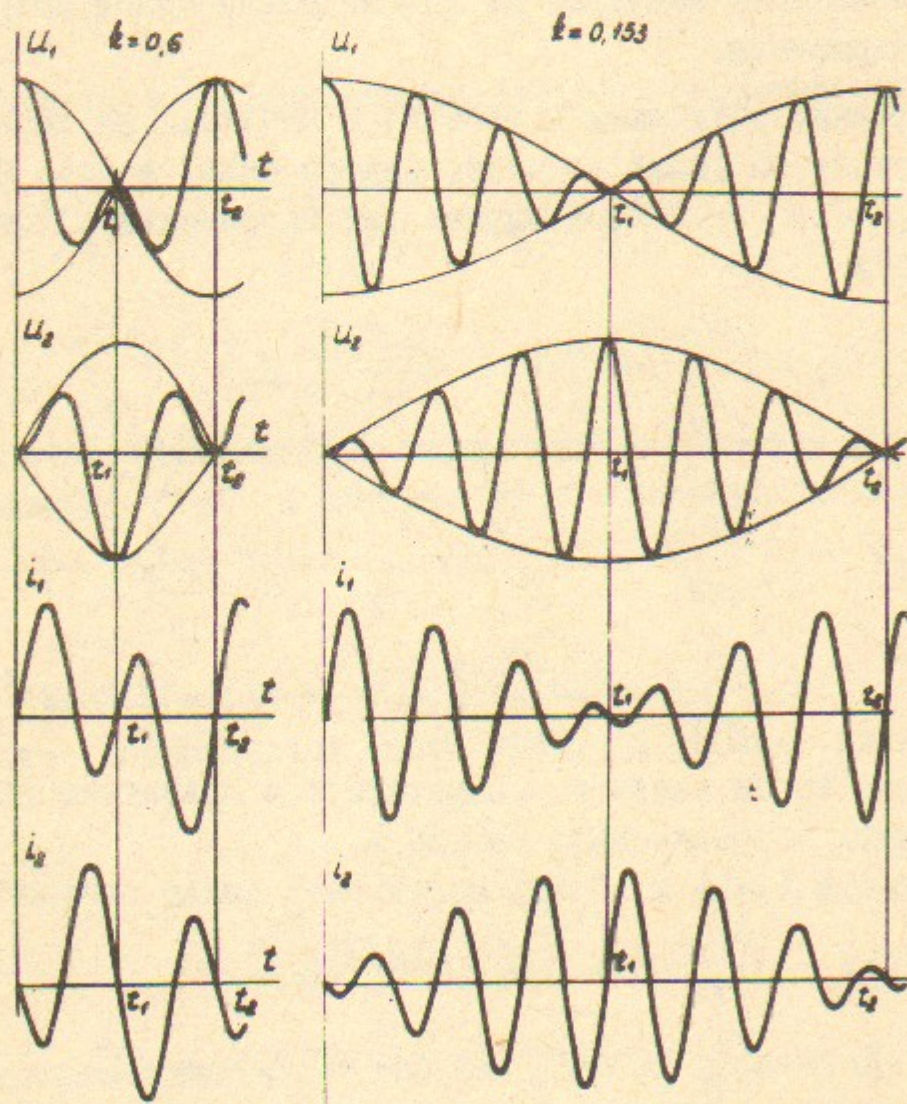


Рис.2. Кривые напряжений и токов в контурах трансформатора Тесла без потерь, отличающихся коэффициентом связи.

Как показано в [2], напряжение u_2 достигает предельной величины $U_{2max} = U_{10} \sqrt{L_2/L_1}$ на первом полупериоде биений лишь при некоторых фиксированных значениях k (1; 0,6; 0,385; 0,28; 0,22 и т.д.). Указанный ряд k получается из условия равенства отношения частот колебаний и биений целому нечетному числу; в этом случае одно из амплитудных значений связанных колебаний точно совпадает с максимальным значением огибающей биений. Оптимальный ряд значений k получаем из уравнения:

$$\frac{\Omega_{cb}}{\Omega_{\delta}} = \frac{\omega_{II} + \omega_I}{\omega_{II} - \omega_I} = \frac{\sqrt{1+k} + \sqrt{1-k}}{\sqrt{1+k} - \sqrt{1-k}} = n,$$

что дает

$$k_{opt} = \frac{2n}{n^2 + 1}, \quad (I-15)$$

где $n = 1, 3, 5, 7$ и т.д. При выполнении этого условия через время, равное половине цикла биений, вся энергия, накопленная предварительно в C_1 , оказывается сосредоточенной в C_2 . Возможность полной передачи энергии из емкости первичного контура в емкость вторичного контура является одним из важнейших свойств трансформатора Тесла.

Формула (I-15) в общем случае (при произвольном n) может рассматриваться как зависимость коэффициента связи от числа полуволн колебаний n , укладывающихся на одном цикле биений, (и наоборот). Это число может быть и целым и дробным.

В современных ускорителях заряженных частиц коэффициент связи контуров, как правило, берется равным 0,6 или 0,385. В таблице I помещены основные параметры таких систем, определенные из приведенных выше зависимостей. Отношение I_{max}/I_{eg} дает величину пиковых значений токов в контурах в долях собственных токов $I_{eg} = U_{max}/\sqrt{L/C}$ соответствующих контуров. Отношение амплитуды обратной полуволны напряжения, предшествующей рабочей полуволне, к амплитуде последней ($U_{2обр}/U_{2max}$), играющее важную роль при работе трансформатора Тесла с нагрузкой (см. ниже), также приводится в таблице I. В последней графе дается значение числового множителя в формуле

$$U_{10} I_{1max} = \beta \cdot W_1 f_0, \quad (I-16)$$

где

$$W_1 = \frac{C_1 \cdot U_{10}^2}{2}, \quad \text{а } f_0 = \omega_0 / 2\pi.$$

Произведение $U_{10} \cdot I_{1 \max}$ — один из основных параметров ключа (коммутатора) первичного контура.

Таблица I

k	n	ω_I / ω_0	ω_{II} / ω_0	$\Omega_{\delta I} / \omega_0$	$\Omega_{\delta II} / \omega_0$	$I_{\max} / I_{\text{рег}}$	$U_{2 \text{обр}} / U_{2 \max}$	β
0,6	3	0,79	1,58	1,19	0,395	1,08	0,565	13,6
0,385	5	0,85	1,27	1,06	0,212	1,03	0,82	12,9

На выбор величины коэффициента связи контуров влияет ряд факторов.

а) При заданной добротности контуров потери энергии за время перекачки её из C_1 в C_2 уменьшаются с ростом k , что выражено количественно формулой (I-23). Уменьшается, следовательно, нагрев обмоток трансформатора за I цикл биений, возрастает допустимая по нагреву частота следования импульсов и к.п.д. ускорителя, особенно — при размыкании первичного контура после первого цикла биений (режим рекуперации энергии контуров).

б) С ростом k благодаря уменьшению количества полуволн напряжения в одном цикле увеличивается электрическая прочность трансформатора и присоединенной к нему ускорительной трубки.

в) В режимах работы ускорителя с длинными импульсами тока нагрузки (длительность импульса тока соизмерима с длительностью полуволны напряжения) допустимая величина энергии, уносимой током нагрузки в импульсе, ограничиваемая электрической прочностью системы, возрастает, как показано в /26/, с ростом k (см. ч. II).

г) При больших k в ряду $k_{\text{онт}}$ улучшается стабильность работы ключа первичного контура. В момент t_1 (рис.2), когда вся энергия сосредоточена в C_2 , а напряжения на элементах первичного контура и ток в нем равны нулю, имеется тенденция (как правило, нежелательная), к прекращению протекания первичного тока.

Если это происходит, то энергия из вторичного контура не возвращается в первичный, и во вторичном контуре происходят затухающие колебания* с частотой ω_0 . Однако после прекращения тока i_1 на ключе первичного контура появляется напряжение, стремящееся поддержать ток. Напряжение на индуктивности L_1 во время протекания тока i_1

$$U_L = L_1 \cdot di_1/dt + M \cdot di_2/dt,$$

и в момент t_1 оно равно нулю. Прерывание тока i_1 исключает из приведенной формулы первый член. Определим величину напряжения, обусловленную членом $M \cdot di_2/dt$. В момент t_1 во вторичном контуре начинается процесс свободных колебаний с собственной частотой контура:

$$i_2 = \frac{U_{2 \max}}{\sqrt{L_2/C_2}} \cdot \sin \omega_0 (t - t_1);$$

$$M \cdot \left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=t_1} = k \sqrt{L_1 L_2} \frac{U_{2 \max}}{\sqrt{L_2/C_2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = k U_{10}$$

Таким образом, напряжение на ключе первичного контура, в случае прекращения протекания тока i_1 , оказывается равным $k U_{10}$ и при больших k соизмеримо с начальным напряжением U_{10} .

д) В некоторых случаях, например, при использовании в качестве высоковольтного диэлектрика воды имеется тенденция использовать в качестве рабочей первую полуволну высокого напряжения связанных колебаний. Получение достаточно высокого коэффициента передачи энергии во вторичный контур на первой полуволне возможно при больших значениях k (рис.3), а полная передача только при $k = 1$, что практически трудно достижимо в высоковольтных ускорителях с безжелезным трансформатором**).

ж) Это явление в контурах со слабой связью в свое время использовалось для генерации затухающих колебаний в радиопередатчиках /27/ (так называемая "схема ударного возбуждения").

з) Такой режим реализуется, например, при зарядке одной емкости от другой через импульсный трансформатор с железным сердечником с малой величиной индуктивности рассеяния по сравнению с индуктивностью намагничивания и при выполнении, разумеется, условия $L_1 C_1 = L_2 C_2$.

е) Размеры ускорителя при прочих равных условиях увеличиваются с ростом коэффициента связи.

Последнее обстоятельство заставляет ограничивать величину k , и выбирать его значения (иногда уходя от оптимальных) в зависимости от всей совокупности перечисленных выше и других факторов, важнейшим из которых является характер нагрузочного режима ускорителя (см. ч. II).

Передача энергии из первичного контура во вторичный

Одним из важных параметров трансформатора Тесла является доля энергии, передаваемой из емкости C_1 в емкость C_2 в первом цикле обений в режиме холостого хода (х.х.). Этот параметр будем для краткости называть эффективностью трансформатора Тесла (\mathcal{E}).

$$\mathcal{E} = \frac{C_2 U_{2\max}^2}{2} / \frac{C_1 U_{10}^2}{2} \quad (I-17)$$

Ввиду наличия потерь энергии в контурах \mathcal{E} всегда меньше 1. Отклонение величины коэффициента связи от одного из оптимальных значений так же, как указывалось выше, снижает величину эффективности. Аналогичное действие оказывает и неточность в настройке системы. Рассмотрим количественную зависимость величины \mathcal{E} от каждого из перечисленных факторов (подробный анализ этих характеристик был выполнен в работе /26/).

а) Коэффициент связи

На рис.3 показана зависимость коэффициента передачи энергии (\mathcal{E}) из первичной емкости во вторичную для первых трех полувольт вторичного напряжения от величины коэффициента связи, вычисленная по выражению (I-10). Как видно из рис.3, при использовании в качестве рабочей 2-ой и 3-ей полувольт уменьшение \mathcal{E} при отклонениях k от оптимальных значений (0,6 и 0,385) сравнительно мало. Однако, при работе трансформатора Тесла с рекуперацией величина возвратившейся в емкость C_1 энергии, как показывает расчет по выражению (I-9), весьма чувствительна к отклонениям k от оптимальных значений. Так, например, при $k=0,5$ в емкость первичного контура в режиме холостого хода возвращается менее 70% первоначально накопленной энергии с напряжением

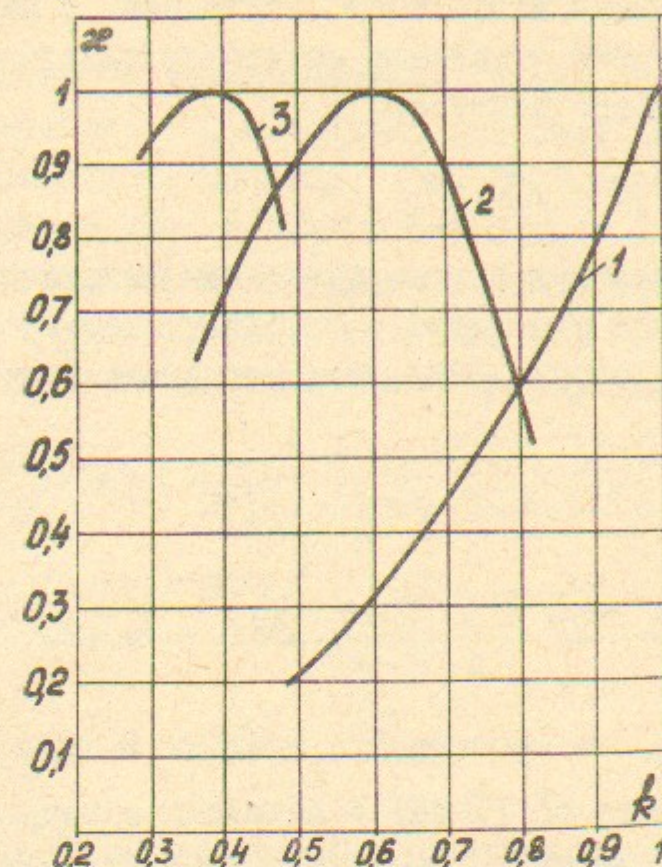


Рис.3. Зависимость эффективности-коэффициента передачи энергии из первичной емкости во вторичную (\mathcal{E}) для первой (кривая 1), второй (2) и третьей (3) полувольт.

нужного знака. Остальная—после размыкания первичного контура рассеивается во вторичном. Результаты расчета доли возвращающейся в C_1 энергии в режиме холостого хода (γ) при некоторых значениях k приведены в таблице 2.

Таблица 2

k	0,35	0,385	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
γ	0,9	1	0,72	0,68	0,88	1	0,88

б) Настройка системы

Нарушение условия равенства собственных частот первичного и вторичного контуров меняет формы колебаний токов и напряжений и энергетические характеристики системы. Проанализируем здесь влияние расстройки системы только на эффективность трансформато-

ра и форму колебаний вторичного напряжения. В качестве меры расстройки (α) примем отношение квадратов собственных частот вторичного и первичного контуров.

$$\alpha = L_1 C_1 / L_2 C_2. \quad (I-18)$$

Задача нахождения закона изменения напряжения U_2 при произвольной величине отношения собственных частот контуров была впервые решена в работе /28/. Решение имеет вид:

$$U_2 = U_{10} \frac{M}{(1-k^2)L_1 L_2 C_2 (\omega_{II}^2 - \omega_I^2)} (\cos \omega_I t - \cos \omega_{II} t),$$

причем

$$\omega_{I,II}^2 = \frac{\omega_{1p}^2 + \omega_{2p}^2 \mp \sqrt{(\omega_{1p}^2 + \omega_{2p}^2)^2 - 4\omega_{1p}^2 \omega_{2p}^2 (1-k^2)}}{2(1-k^2)},$$

где ω_{1p} и ω_{2p} - собственные частоты контуров.

Вводя параметр α (I-18) и выполнив преобразования, приведем последние выражения к более удобному для анализа виду:

$$U_2 = \frac{U_{10}}{2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot A (\cos \omega_I t - \cos \omega_{II} t); \quad (I-19)$$

$$\omega_{I,II}^2 = \omega_{2p}^2 \frac{1+\alpha \mp \sqrt{(1-\alpha)^2 + 4\alpha k^2}}{2\alpha(1-k^2)}; \quad (I-20)$$

$$A = \frac{2\alpha k}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + 4\alpha k^2}}. \quad (I-21)$$

Для определенности будем считать, что параметры контуров: L_1 , L_2 и C_2 остаются неизменными, и изменение α происходит за счет C_1 . При этом положим, что $C_1 = C_{1p} \cdot \alpha$ (C_{1p} - резонансное значение емкости C_1). Качественный анализ выражений (I-19), (I-20) и (I-21) позволяет установить следующее:

1. Характер кривой U_2 остается таким же, как и при $\alpha = 1$ (выражение в скобках не изменилось), однако частоты ω_I и ω_{II} зависят от α .

2. Амплитуда огибающей U_2 и, соответственно, коэффициент трансформации меняются в A раз (при $\alpha = 1$, из (I-21), $A=1$).

3. Эффективность трансформатора, таким образом, будет меняться при изменении α , во-первых, за счет изменения коэффициента трансформации и, во-вторых, за счет изменения соотношения между частотами ω_I и ω_{II} , что меняет форму колебаний. Не принимая во внимание пока формы колебаний, найдем зависимость \mathcal{E} от α , обусловленную зависимостью от α амплитуды огибающей. По определению эффективности трансформатора (I-17)

$$\mathcal{E} = \frac{C_2 U_{2max}^2}{C_1 U_{10}^2} = \frac{C_2 (U_{10} \sqrt{L_2/L_1} \cdot A)^2}{C_{1p} \alpha \cdot U_{10}^2} = \frac{A^2}{\alpha}$$

или (подставляя значение A по (I-21))

$$\mathcal{E} = \frac{4\alpha k^2}{(1-\alpha)^2 + 4\alpha k^2}. \quad (I-22)$$

Формула (I-22) позволяет делать количественные оценки изменения эффективности трансформатора Тесла при невыполнении условия $L_1 C_1 = L_2 C_2$. Следует отметить, что эффективность трансформатора меняется одинаково независимо от того, $L_1 C_1 > L_2 C_2$ или наоборот. В этом легко убедиться, подставив в формулу (I-22) $1/\alpha$ вместо α . Не меняется в этом случае и соотношение частот ω_I и ω_{II} , что видно из (I-20). Поэтому на рис.4 зависимости $\mathcal{E} = f(\alpha)$ для $k = 0,6$ и $0,385$ приведены только для $\alpha \geq 1$.

Влияние на величину \mathcal{E} изменения формы колебаний можно учесть следующим образом. Для заданных k и α по (I-20) находится отношение ω_{II}/ω_I . Для настроенной системы из (I-7)

$$\frac{\omega_{II}}{\omega_I} = \frac{\sqrt{1+k}}{\sqrt{1-k}}, \quad \text{откуда}$$

$$k = \frac{(\omega_{II}/\omega_I)^2 - 1}{(\omega_{II}/\omega_I)^2 + 1}.$$

Подставляя найденное для рассматриваемого случая значение ω_{II}/ω_I в последнее выражение, находим эквивалентную по форме колебаний величину коэффициента связи для настроенной системы и из рис.3 - значение эффективности. На рис.4 соответствующие зависимости для $k = 0,6$ и $0,385$ также приводятся. Результиру-

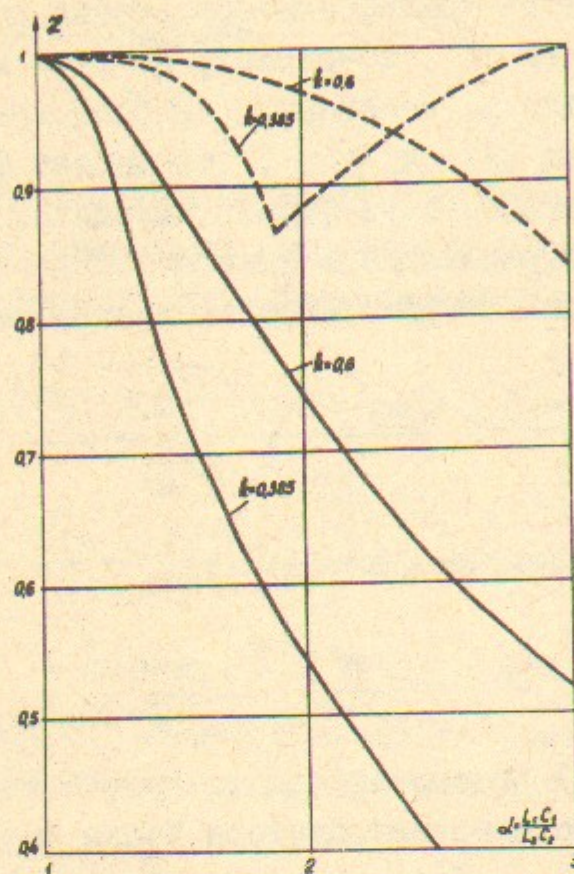


Рис. 4

Зависимость эффективности трансформатора Тесла от степени расстройки контуров для $k = 0,6$ и $0,385$. Сплошные кривые — зависимости, обусловленные изменением коэффициента трансформации; пунктирные — изменением формы кривой

шая эффективность трансформатора есть произведение эффективностей от обоих рассмотренных факторов. Как видно из этого рисунка, при $\alpha < 1,5$ (собственные частоты контуров отличаются не более, чем на 20%) влиянием последнего фактора можно пренебречь. Влияние α на эффективность трансформатора тем сильнее, чем меньше коэффициент связи контуров (еще одно достоинство сильной связи).

в) Затухание колебаний

Из уравнения (I-6), полученного для контуров с одинаковыми добротностями, не трудно получить зависимость эффективности трансформатора от коэффициента затухания одиночного контура. Через промежуток времени $T\delta/4$, когда вся энергия контуров (для оптимального ряда коэффициентов связи) сосредоточена в емкости

C_2 .

$$U_{2max} = \frac{U_{10} \sqrt{L_2}}{2 L_1} (e^{-\delta_I T/4} + e^{-\delta_{II} T/4}).$$

Разложив экспоненты в степенной ряд и пренебрегая членами, содержащими квадрат и более высокие степени показателя экспоненты, получим

$$U_{2max} = U_{20} [1 - \frac{T\delta}{8} (\delta_I + \delta_{II})]$$

и

$$\alpha = \left(\frac{U_{2max}}{U_{20}} \right)^2 = [1 - \frac{T\delta}{8} (\delta_I + \delta_{II})]^2,$$

где U_{20} — максимальное значение вторичного напряжения при отсутствии затухания, равное $U_{10} \sqrt{L_2/L_1}$.

Пользуясь выражениями (I-8) и (I-14) и заменяя коэффициент затухания через добротность контура ($\delta = \omega_0/2Q$), получаем формулу для определения эффективности трансформатора для оптимального ряда значений коэффициентов связи

$$\alpha = \left(\frac{Q-P}{Q} \right)^2, \quad (I-23)$$

где

$$P = f(k) = \frac{\pi}{2 \sqrt{1-k^2} (\sqrt{1+k} - \sqrt{1-k})}$$

Для $k = 0,6$ $P = 3,1$; для $k = 0,385$ $P = 4,33$. С уменьшением k P возрастает и α падает, что, как указывалось выше, является одним из аргументов для использования больших коэффициентов связи. Формула (I-23) может применяться и для контуров с различной добротностью. В этом случае эквивалентное значение Q , подставляемое в (I-23), определяется, как показано в /26/, из выражения

$$Q_{экв} = \frac{2 \cdot Q_1 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2}.$$

Следует иметь в виду, что определение эффективности трансформатора по формуле (I-23) возможно, если $Q \gg 1$. В противном случае, расчет режима должен проводиться путем численного интегрирования уравнений (I-1) и (I-2).

II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА С НАГРУЗКОЙ

В ускорителях заряженных частиц рассматриваемого типа применяются в основном следующие режимы нагрузки: а) длительность импульса тока нагрузки, включаемого ключом K_2 (рис.1), много меньше длительности рабочей полуволны напряжения; б) ток нагрузки имеет вид прямоугольного импульса, длительность которого соизмерима с длительностью рабочей полуволны напряжения; в) ток нагрузки протекает в течение всего периода рабочей полуволны, причем его величина связана с величиной напряжения законом $3/2$ (диодный режим):

$$i_H = p \cdot U_2^{3/2} \quad (\text{II-1})$$

Принципиально возможен осуществленный в резонансном трансформаторе промышленной частоты [29] режим, при котором закон изменения тока нагрузки подбирается таким образом, чтобы обеспечить постоянство U_2 , т.е. монохроматичность пучка, в течение всего импульса тока. Ввиду ряда трудностей* такой режим, однако, в ускорителях рассматриваемого типа пока не применялся.

Встречаются случаи, когда ток нагрузки много меньше максимального тока, протекающего во вторичном контуре в режиме холостого хода. Такой режим, естественно, не требует специального анализа.

Изучение различных нагрузочных режимов (кроме диодного) и расчет характеристик были проведены в работе [26]. Ниже рассматриваются перечисленные выше режимы нагрузки.

Ток нагрузки малой длительности

Длительность импульса $\tau \ll T_0$ — периода собственных колебаний контуров (рис.5). Величина тока и форма импульса — произвольные. В этом случае ток включается в момент максимума U_2

*) Формирование необходимой формы импульса тока и её перестройка при изменении уровня рабочего напряжения — достаточно сложная задача; требования к оптике ускорительной трубки при меняющемся токе ужесточаются по сравнению с режимом постоянного тока в импульсе; источник заряженных частиц должен выбираться по максимальному току в импульсе (приблизительно в 2 раза больше среднего); требование к монохроматичности пучка ускоренных частиц часто сочетается с требованием постоянства тока в импульсе, что также осуществимо [31].

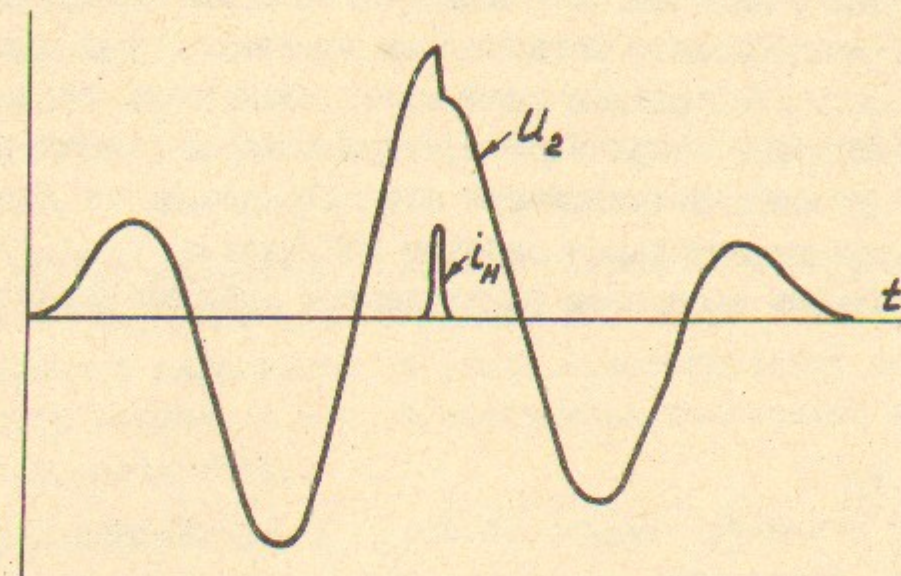


Рис.5.

и уносит часть заряда $\Delta q = \int_0^{\tau} i_H dt$ и часть энергии из емкости C_2 ; подсадка напряжения U_2 составляет величину

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta q}{C_2} \quad (\text{II-2})$$

После окончания тока нагрузки в контурах идет обычный процесс холостого хода с пониженными напряжениями и токами контуров.

В сильноточных ускорителях с разрядником-обострителем емкость C_2 разряжается током нагрузки полностью.

Для работы в режиме коротких импульсов тока нагрузки величина емкости C_2 выбирается из условия обеспечения допустимой величины подсадки напряжения (II-2) либо из условия накопления необходимой энергии. Один из недостатков режима — большой разброс кинетической энергии заряженных частиц, если унос энергии, накопленной в емкости C_2 , составляет заметную величину*).

Прямоугольный импульс тока нагрузки

Наиболее распространенным режимом нагрузки в разработанных и разрабатываемых ускорителях типа ЭЛИТ является режим прямоугольного импульса тока, длительность которого соизмерима с

*) Это не относится к случаю, когда в период включения нагрузки емкость ведет себя как формирующая линия.

длительностью полуволны напряжения (рис.6 и 12).

Ток нагрузки включается в период нарастания напряжения на емкости C_2 и выключается, когда после перехода через максимум напряжение становится равным начальному. Благодаря подпитке током из индуктивности вторичного контура в таком режиме ток нагрузки может уносить значительную энергию (порядка и более запасаемой в C_2 при максимальном рабочем напряжении U_{2max}) с относительно небольшим разбросом кинетической энергии заряженных частиц.

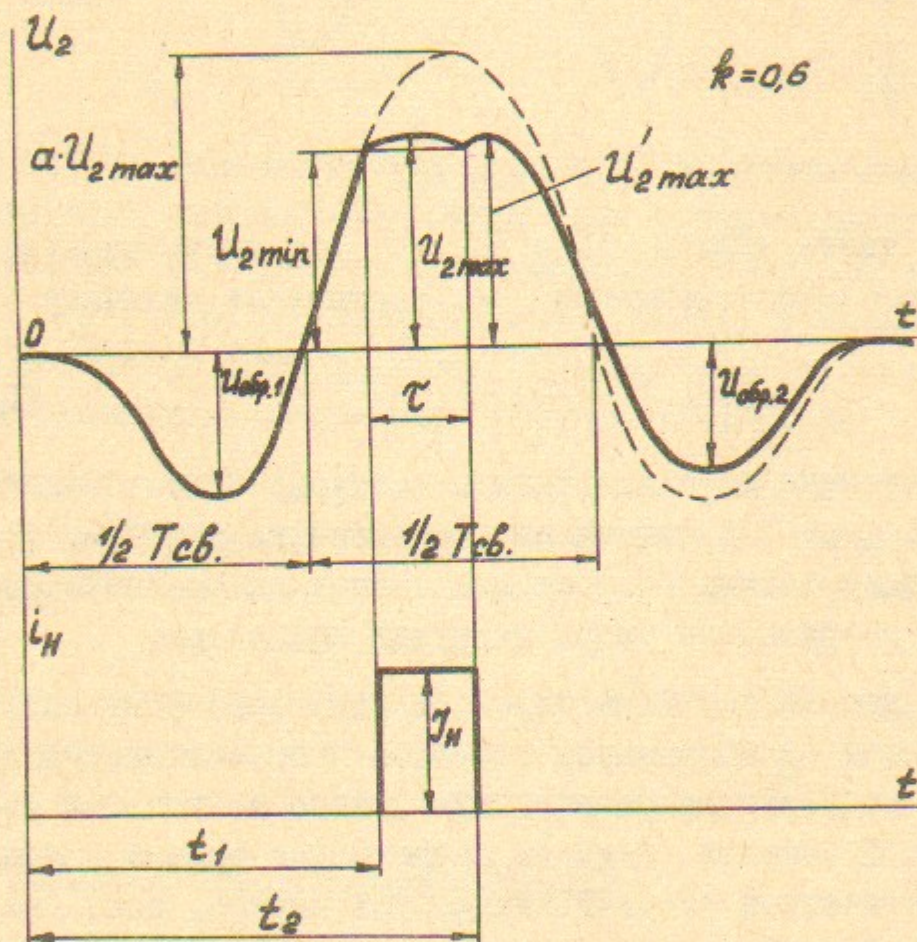


Рис.6

Решение уравнений, расчет характеристик трансформатора при работе в рассматриваемом режиме и их анализ для $k = 0,6$ и $0,385$ выполнены в работе /26/. Некоторые характеристики трансформатора, имеющего коэффициент связи $0,6$, для рассматриваемого режима были получены авторами работы /30/ экспериментально на специальном макете. Постановка достаточно трудоемких экспериментов по

снятию характеристик системы в режиме, имеющем аналитическое решение, может объясняться тем, что эквивалентное сопротивление нагрузки в этом случае меняется во времени, создавая кажущиеся трудности для решения ("нелинейность нагрузки") и тем, что авторам, по-видимому, была неизвестна работа /26/.

Для выбора параметров системы связанных контуров, работающих в режиме нагрузки прямоугольным импульсом тока, определения величин токов и напряжений, а также энергетических соотношений в конкретном режиме, и его осуществления необходимо либо желательно знать следующее.

1. В какой момент t_1 (рис.6) следует включить ток нагрузки, чтобы конечное напряжение равнялось начальному, т.е., чтобы был обеспечен минимальный разброс энергии заряженных частиц в импульсе.

2. Как зависит отношение U_{2min}/U_{2max} (немонохроматичность пучка) от длительности импульса и величины тока нагрузки.

3. На сколько нужно увеличить начальное напряжение на емкости первичного контура по сравнению с режимом х.х., чтобы компенсировать подсадку вторичного напряжения током нагрузки.

4. Как в зависимости от параметров тока нагрузки меняются максимальные значения обратных полуволн вторичного напряжения ($U_{обр1}$ и $U_{обр2}$) и прямого напряжения (U'_{2max}) после окончания импульса тока нагрузки, которые могут превысить допустимые значения, что накладывает принципиальные ограничения на параметры импульса тока.

5. Как меняются в зависимости от параметров импульса тока энергетические характеристики режима (величина унесенной пучком энергии в долях энергии, запасаемой в емкости C_2 при максимальном рабочем напряжении U_{2max} (эта величина является проектной энергоемкостью C_2), коэффициент передачи энергии из первичной емкости в пучок заряженных частиц, теоретической к.п.д. при осуществлении режима рекуперации).

6. Как меняются характеристики режима при изменении коэффициента связи.

Определить токи и напряжения в контурах в период и после протекания тока нагрузки расчетным путем можно различными мето-

дами теории электрических цепей, в частности, методом наложения по эквивалентной схеме, представленной на рис.7, которая является линейной (переменное сопротивление нагрузки заменено источниками тока). После замыкания ключа K_1 в момент $t = 0$ в

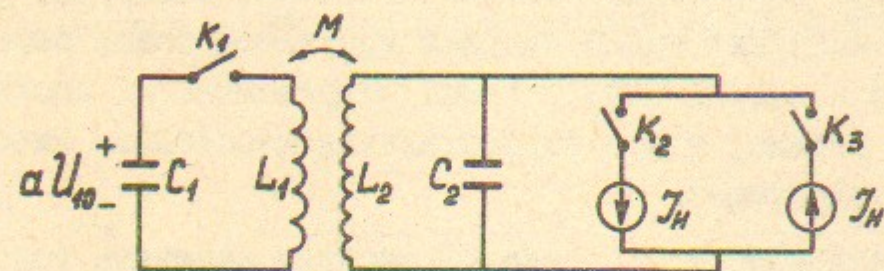


Рис.7. Эквивалентная схема нагрузки прямоугольным импульсом тока

контурах идет обычный процесс режима х.х., но с увеличенным в a раз начальным напряжением на емкости C_1 по сравнению с режимом без нагрузки с тем, чтобы в период нагрузки напряжение U_{2max} (рис.6) равнялось номинальному напряжению вторичного контура. В момент t_1 включается ключ K_2 , и вторичный контур нагружается током J_H , в момент t_2 замыкается ключ K_3 — источники тока замыкаются друг на друга, а их общий ток, нагружающий вторичный контур, становится равным нулю. В соответствии с методом наложения токи и напряжения в контурах проходят три стадии: на первой — процесс х.х., на второй — (в период нагрузки) к первому процессу добавляется процесс, обусловленный включением "прямого" источника тока на систему с нулевыми (до замыкания ключа) токами и напряжениями в начальный момент и, наконец, в третьей стадии (после отключения нагрузки) к первым двум процессам прибавляется процесс, обусловленный включением "обратного" источника тока (также при нулевых начальных условиях).

Напряжения U_1 и U_2 в период х.х. описываются зависимостями (I-9) и (I-10). Рассмотрим процесс в контурах с нулевыми начальными условиями после включения источника тока. Сразу после замыкания ключа ток в емкости C_2 становится равным J_H ; напряжения в контурах и токи в индуктивностях ос-

таются нулевыми. Имеем дифференциальные уравнения (знаки токов соответствуют Рис.1):

$$U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt},$$

$$U_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt},$$

$$i_1 = -C_1 \frac{dU_1}{dt},$$

$$i_{2c} = i_2 + J_H = -C_2 \frac{dU_2}{dt}.$$

Из последних уравнений имеем $\frac{di_1}{dt} = -C_1 \frac{d^2 U_1}{dt^2}$ и $\frac{di_2}{dt} = -C_2 \frac{d^2 U_2}{dt^2}$. После подстановки последних выражений в первые два уравнения получаем такие же дифференциальные уравнения для напряжений в контурах, как и для режима х.х. (I-1) и (I-2) при $R_1 = R_2 = 0$. Уравнения не содержат тока нагрузки благодаря постоянству последнего. Не приводя хода решения, не отличающегося от случая х.х., приведем уравнения для U_1 и U_2 в рассматриваемом режиме, которые для начальных условий:

$$U_1 = 0; U_2 = 0; \frac{dU_1}{dt} = 0; \frac{dU_2}{dt} = -\frac{J_H}{C_2} \text{ получаются в виде:}$$

$$U_1 = -\frac{J_H}{2\omega_0 C_2} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \left(\sqrt{1+k} \cdot \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t - \sqrt{1-k} \cdot \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t \right)$$

$$U_2 = -\frac{J_H}{2\omega_0 C_2} \left(\sqrt{1+k} \cdot \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t + \sqrt{1-k} \cdot \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t \right)$$

Суммируя все три стадии процесса, описывающего режим нагрузки прямоугольным импульсом тока, после приведения величин к относительным единицам (соответствующие выкладки опускаем), получаем следующие уравнения для напряжений в контурах:

$$U_1^* = \frac{a}{2} \left[\cos \frac{1}{\sqrt{1+k}} t^* + \cos \frac{1}{\sqrt{1-k}} t^* \right] - \frac{y_H^*}{2} \left[\sqrt{1+k} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{1+k}} (t^* - t_1^*) - \sqrt{1-k} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{1-k}} (t^* - t_1^*) \right] + \frac{y_H^*}{2} \left[\sqrt{1+k} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{1+k}} (t^* - t_2^*) - \sqrt{1-k} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{1-k}} (t^* - t_2^*) \right], \quad (\text{II-3})$$

$$U_2^* = \frac{a}{2} \left[\cos \frac{1}{\sqrt{1+k}} t^* - \cos \frac{1}{\sqrt{1-k}} t^* \right] - \frac{y_H^*}{2} \left[\sqrt{1+k} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{1+k}} (t^* - t_1^*) + \sqrt{1-k} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{1-k}} (t^* - t_1^*) \right] + \frac{y_H^*}{2} \left[\sqrt{1+k} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{1+k}} (t^* - t_2^*) + \sqrt{1-k} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{1-k}} (t^* - t_2^*) \right]. \quad (\text{II-4})$$

Вторые члены в обоих уравнениях начинают учитываться при $t \geq t_1$ и третьи - при $t \geq t_2$. В этих уравнениях для получения решения в общем (безразмерном) виде за единицу времени принята величина $T_0/2\pi$ (T_0 - период собственных колебаний контуров), за единицу напряжения U_2 - номинальное рабочее напряжение ускорителя (величина U_{2max} на рис.6), за единицу напряжения U_1 - номинальное рабочее напряжение ускорителя, деленное на идеальный коэффициент трансформации, т.е. $U_{2max}/\sqrt{L_2/C_2}$, за единицу тока нагрузки принят максимальный собственный ток вторичного контура при номинальном напряжении ($U_{2max}/\sqrt{L_2/C_2}$). Обозначения величин, выраженных в относительных единицах, будем снабжать звездочкой.

Уравнения (II-3) и (II-4) справедливы для любого k . При включении тока нагрузки в период действия нечетных полувольт вторичного напряжения ток нагрузки берется со знаком плюс, для четных полувольт - со знаком минус.

Токи в емкостях C_1 и C_2 можно получить, продифференцировав уравнения для U_1 и U_2 ; ток в индуктивности L_2 в период включения нагрузки будет отличаться от тока в C_2 на величину y_H .

Характеристики рассматриваемого режима без учета потерь в контурах, рассчитанные по выражениям (II-3) и (II-4) на ЭВМ, представлены на рис.8-16.

На всех рисунках токи и напряжения измеряются в единицах, указанных выше. За единицу времени для рисунков в отличие от принятой для уравнений взята длительность полупериода связанных колебаний, т.е. длительность рабочей полувольты напряжения при Х.Х. Единица измерения энергии - энергия, запасаемая в емкости C_2 при номинальном напряжении ($C_2 U_{2max}^2 / 2$).

Отметим одну важную особенность режима прямоугольного импульса тока, воспринимаемую зачастую как парадоксальную. При оговоренных выше условиях (ток нагрузки включается в такой момент, чтобы конечное напряжение равнялось начальному) отношение U_{2min}/U_{2max} (рис.6) не зависит от величины тока нагрузки, а определяется только длительностью импульса тока. Строго говоря, функция, описывающая закон изменения U_2 в период протекания тока нагрузки (первые два члена выражения (II-4)) зависит от тока. Однако количественно эта зависимость практически не сказывается и может не приниматься во внимание. Зависимости U_{2min}/U_{2max} от длительности импульса тока нагрузки для $k=0,6$ и $0,385$ представлены соответственно на рис.8 и 14.

На этих же рисунках приводятся величины уносимой энергии в зависимости от тока нагрузки и длительности импульса тока. Кривая $U_{2max}' = 1$ на обоих рисунках разделяет области, где выброс напряжения после окончания импульса тока нагрузки (см. рис.6) меньше U_{2max} (ниже кривой) и - больше U_{2max} (выше кривой).

С ростом тока нагрузки при заданной длительности импульса пропорционально первичному напряжению растет амплитуда обратной полувольты U_2 , предшествующей рабочей полувольте ($U_{обр.1}$). Графики амплитуд обратного напряжения, а также коэффициент увеличения первичного напряжения a по сравнению с режимом х.х. для различных токов нагрузки в зависимости от длительности импульса представлены на рис.9 ($k=0,6$) и рис.15 ($k=0,385$). Следует отметить, что благодаря меньшей величине отношения $U_{обр.1}/U_{2max}$ при $k=0,6$ по сравнению со случаем $k=0,385$ в режиме х.х. (см.табл.1) критические значения $U_{обр.1}$ (например, $U_{обр.1} = U_{2max}$) наступают для системы с $k=0,385$ при токах в несколько раз ($\sim 3,5$) меньших, чем для $k=0,6$. Это обстоятельство дает решающее преимущество системе с коэффициентом индуктивной связи контуров, равном $0,6$, для ускорителей с

большой величиной уносимой энергии в импульсе в рассматриваемом режиме.

Коэффициент передачи энергии из первичной емкости в нагрузку (пучок) β для различных параметров импульсов при $k = 0,6$ представлен на рис. II. Видно, что при токах нагрузки, больших $0,7 + 0,8$ (в принятых единицах) для различных длительностей импульса коэффициент β практически перестает зависеть от тока. Коэффициент β определяет требуемую энергоемкость C_I и (для режима без рекуперации) — к.п.д. ускорителя. Если осуществляется режим рекуперации (размыкание первичного контура в момент времени t_3 (рис. I2)), то в пучок переходит практически вся энергия, накопленная в C_I за вычетом вернувшейся — и потерь в контурах к этому моменту. Энергия, остающаяся во вторичном контуре в момент времени t_3 , в худшем случае не превышает $2 + 3\%$ от $\frac{C_2 U_{2max}^2}{2}$

Точное значение коэффициента связи контуров (например, $k = 0,6$) не всегда удается обеспечить. Если k оказался завышенным, то при необходимости его можно понизить до $0,6$ введением в первичный контур добавочной индуктивности, определяемой по формуле

$$L_{доб} = L_1 \left(\left(\frac{k}{0,6} \right)^2 - 1 \right),$$

которая следует из определения коэффициента связи (см. ч. I);

L_1 — полная индуктивность первичного контура до введения добавочной индуктивности.

Более обычным и интересным (легче осуществимым) является случай заниженного значения k . Как при этом меняется эффективность трансформатора Тесла, было показано в ч. I (рис. 3). Для рассматриваемого режима более важно выяснить влияние величины k на следующие параметры: а) амплитуду обратной полуволны, предшествующей рабочей ($U_{обр.1}$); б) то же для последующей полуволны ($U_{обр.2}$); в) коэффициент передачи энергии из емкости C_I в нагрузку (β) и г) теоретический (без учета потерь в контурах) к.п.д. в режиме рекуперации. Соответствующие расчетные зависимости для значений k в окрестности $k = 0,6$ приведены на рис. I3. Рассматриваются два довольно типичных режима: длительность импульса в обоих случаях $0,35$, токи нагрузки $0,5$ и 1 в принятых для рисунков единицах. Анализ кривых рис. I3 позволяет

сделать следующие выводы. С уменьшением k $U_{обр.1}$ несколько уменьшается (благоприятный фактор), однако $U_{обр.2}$ быстро возрастает (для $k = 0,6$ $U_{обр.2}$ при любых параметрах импульса тока меньше $U_{обр.1}$) и может достигать опасных значений. Коэффициент передачи энергии из C_I в нагрузку (β) слабо уменьшается с уменьшением k . К.п.д. ускорителя в режиме рекуперации также несколько уменьшается при уходе от $k = 0,6$, а при $k < 0,55$ падение к.п.д. становится весьма быстрым. В целом, можно считать, что диапазон величин k от $0,55$ до $0,62$ во многих случаях является приемлемым.

При выборе оптимальных параметров контуров трансформатора Тесла для ускорителя с заданными параметрами пучка приходится учитывать не только рассматриваемые в настоящей работе вопросы, но и различные конструктивные факторы, параметры существующей аппаратуры и проч. Тем не менее, предварительный выбор параметров может обоснованно делаться только на основе характеристик трансформатора. В качестве примера рассмотрим выбор параметров для ускорителя ЭЛИТ-3А, построенного в Институте ядерной физики в 1976 году /31/.

Проектные данные ускорителя: энергия ускоренных электронов $U_{2max} = 2$ МэВ, ток пучка в импульсе 100 А, длительность импульса тока 10 мксек $U_{2min}/U_{2max} \geq 0,9$. При этих параметрах уносимая пучком энергия в импульсе приблизительно равна 2 кДж.

1) Из всей совокупности рассмотренных факторов очевидно, что коэффициент связи контуров в данном случае следует взять равным $0,6$.

2) Из рис. 8 находим, что условие $U_{2min}/U_{2max} \geq 0,9$ выполняется при $\tau^* \leq 0,28$. Из энергетических соображений (см. например, рис. II) целесообразно брать максимально возможную длительность импульса τ^* . Итак, $\tau^* = \tau / \frac{T_{cb}}{2} = 0,28$, откуда $\frac{T_{cb}}{2} = \frac{10}{0,28} = 35,7$ мксек (единица времени на рисунках).

Период собственных колебаний контуров для $k = 0,6$ $T_c = 1,19 \cdot T_{cb}$ (см. табл. I).

$$f_0 = \frac{1}{1,19 \cdot 71,4 \cdot 10^{-6}} = 11,8 \text{ кГц, что}$$

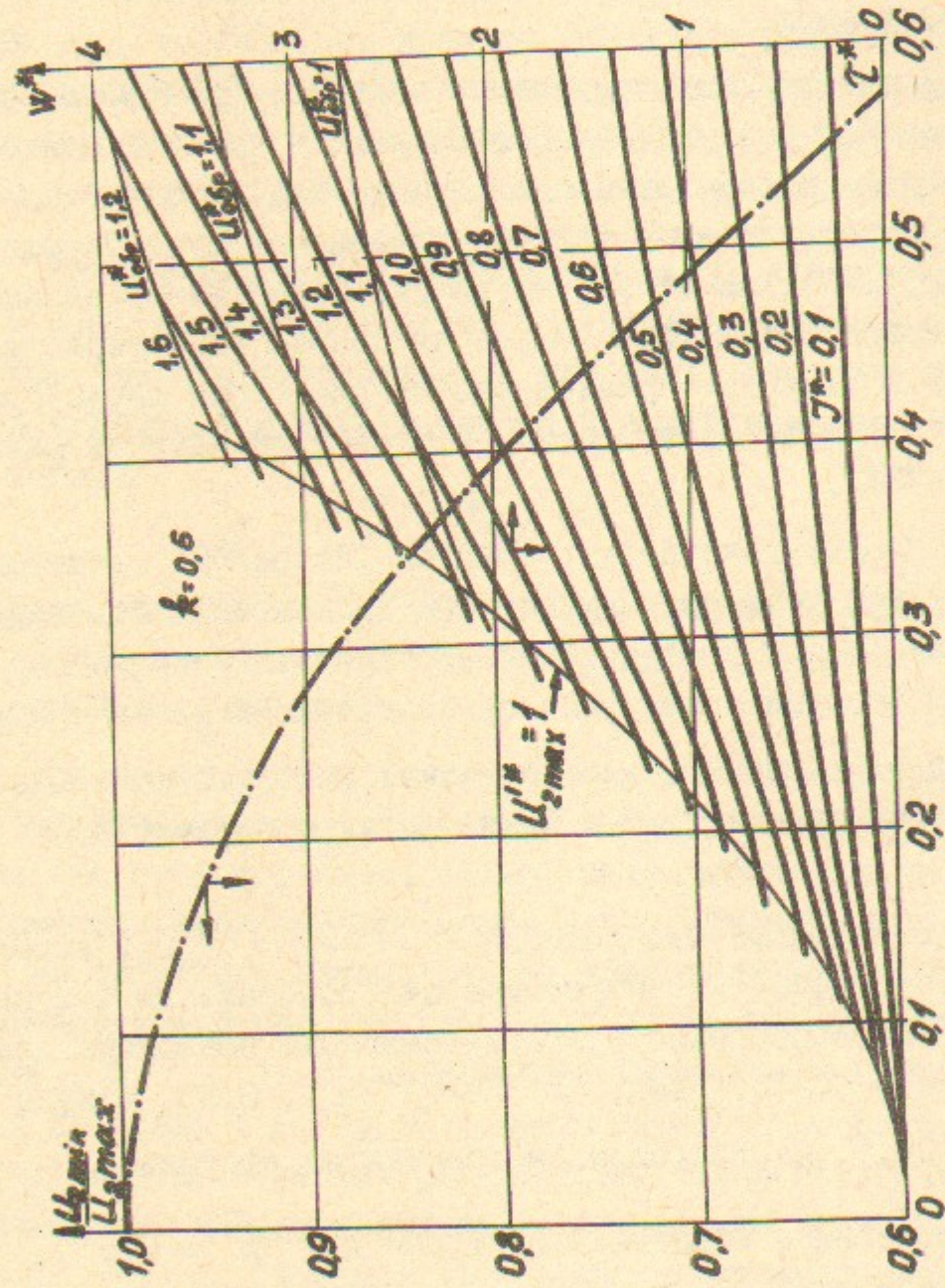


Рис. 8. Отношение минимального напряжения в период протекания тока нагрузки к максимальному для режима прямоугольного импульса тока (пунктирная кривая) и уносимая энергия в зависимости от длительности импульса для различных величин тока (сплошные кривые).

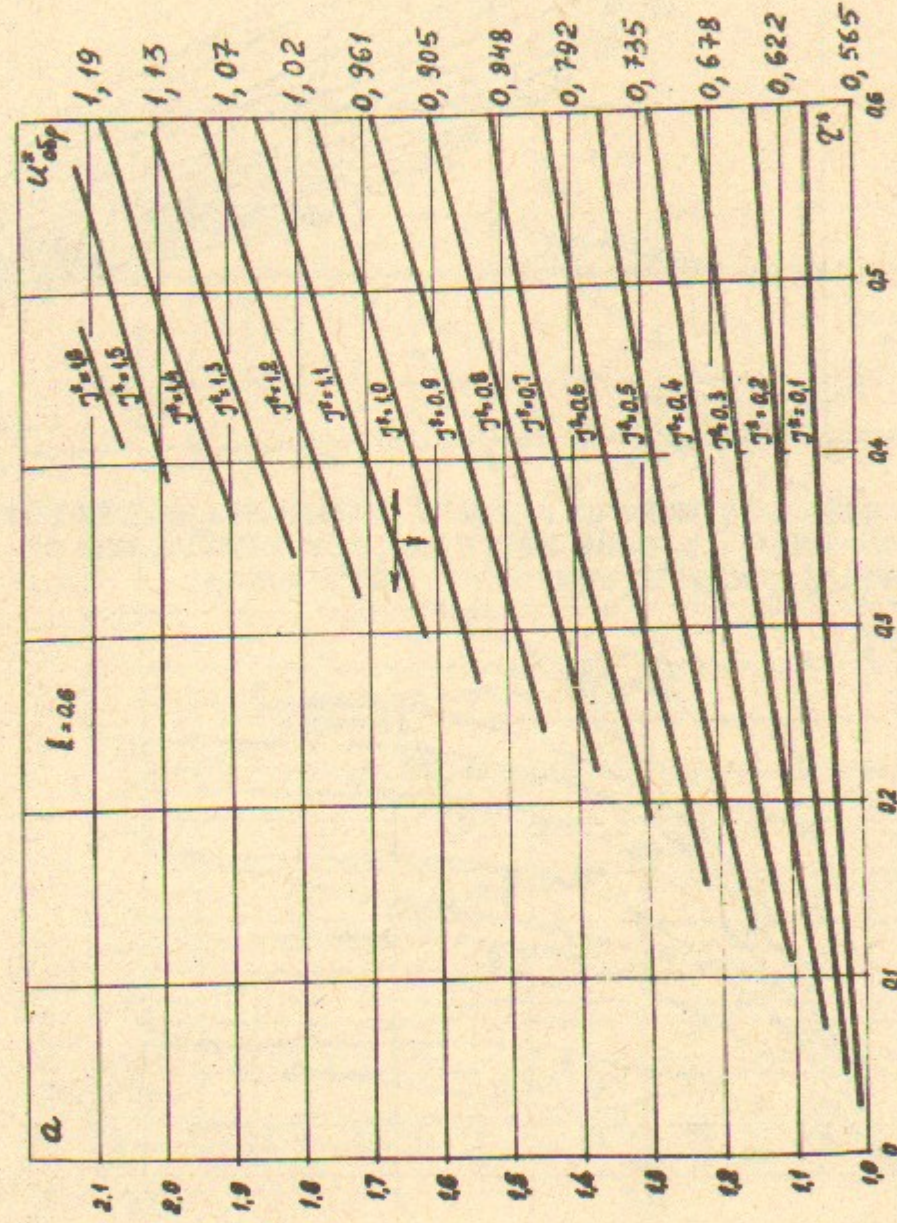


Рис. 9. Коэффициент увеличения первичного напряжения (α) и величина амплитуды обратной полуволны, предшествующей рабочей ($U_{обр}$) для разных величин тока нагрузки в зависимости от длительности импульса.

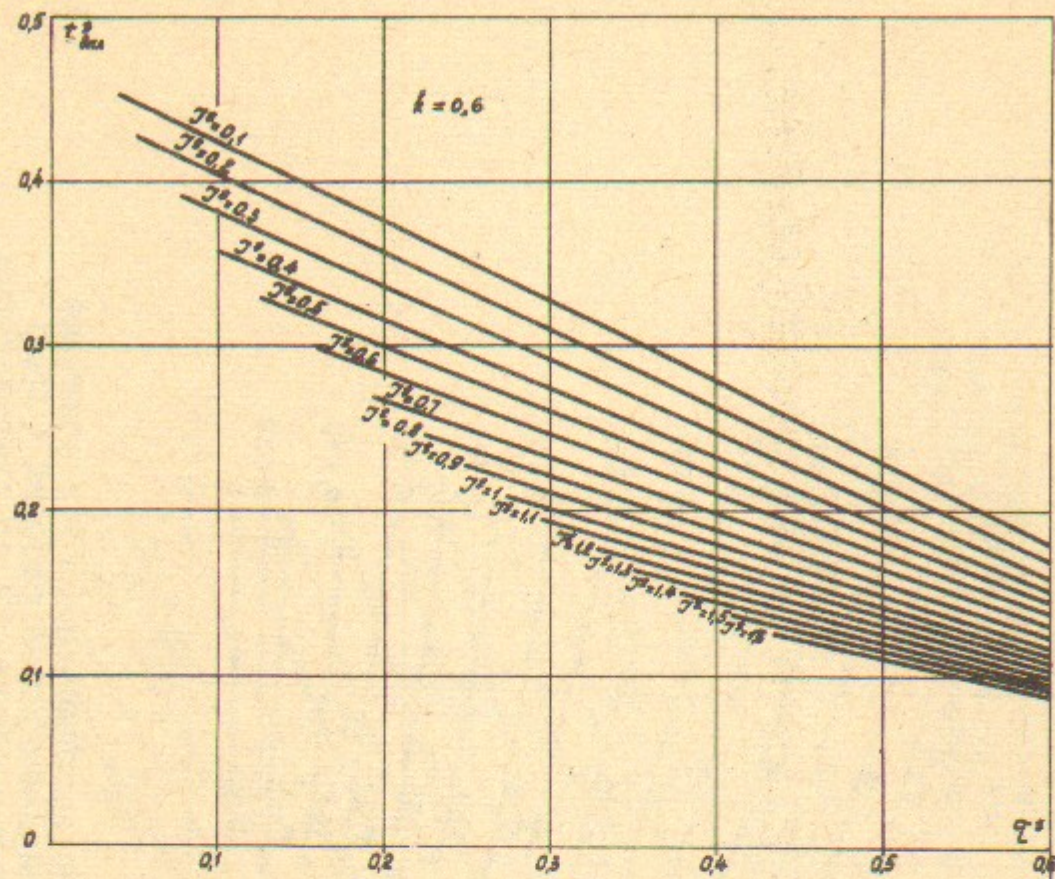


Рис. 10. Оптимальный момент времени включения прямоугольного импульса тока нагрузки, отсчитываемый от начала рабочей полуволны напряжения.

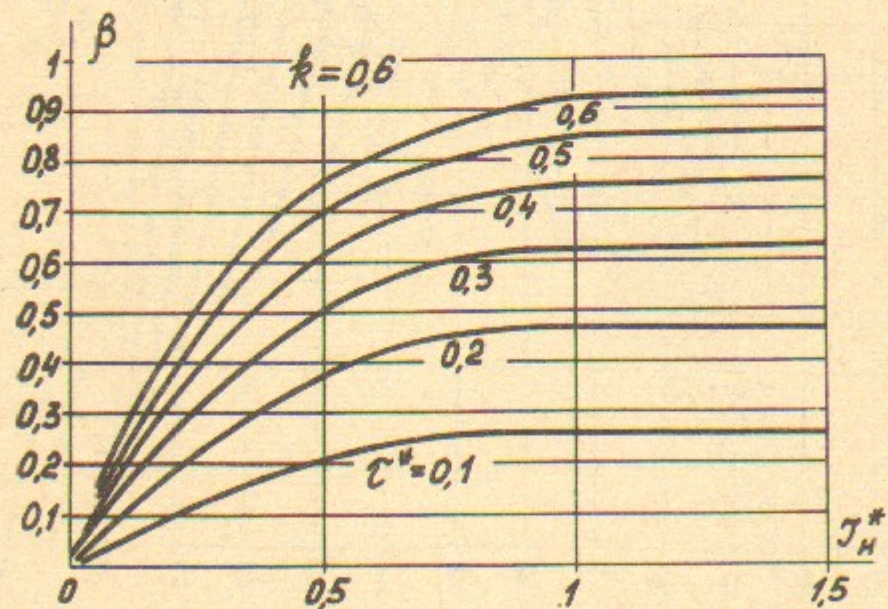


Рис. 11. Коэффициент передачи энергии из первичной емкости в нагрузку (β) для различных длительностей прямоугольного импульса тока нагрузки в зависимости от величины последнего.

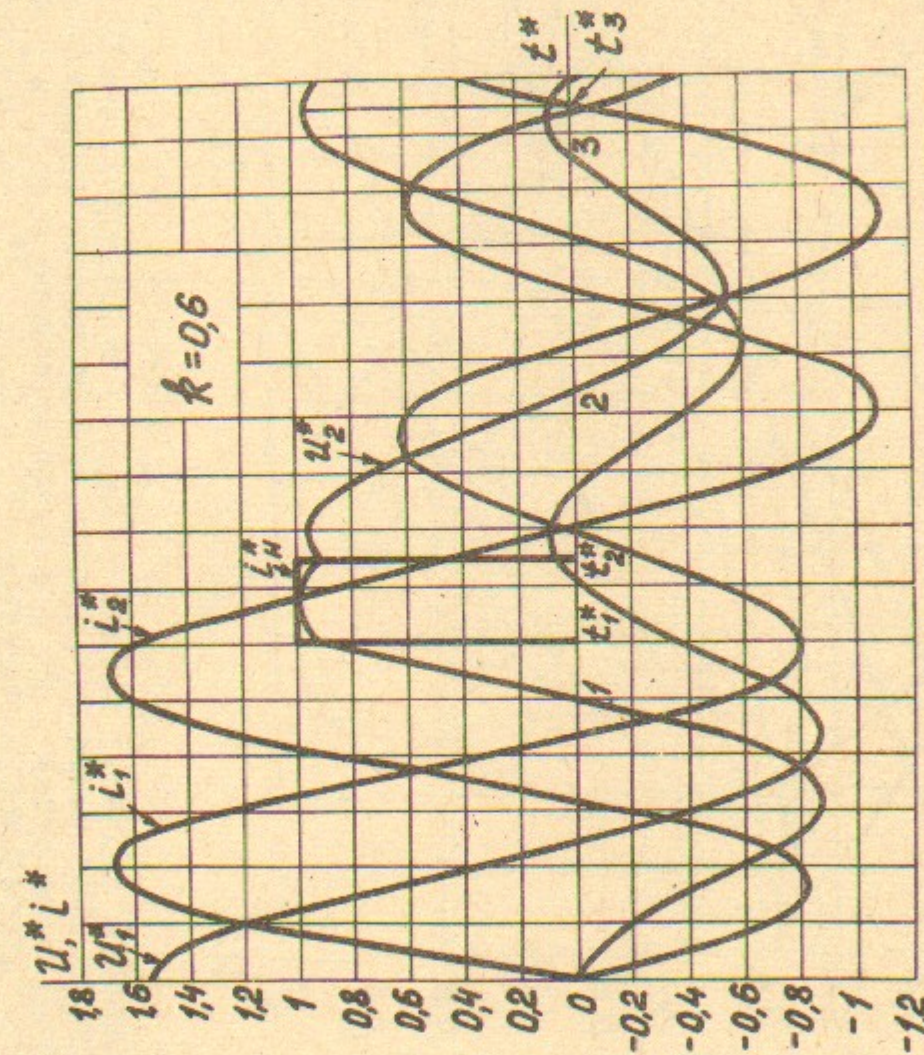


Рис. 12. Расчетные кривые токов и напряжений в контурах для конкретного режима нагрузки: $J_H^* = 1$, $J^* = 0,3$. Знаки для токов и напряжений на рисунке взяты произвольно.

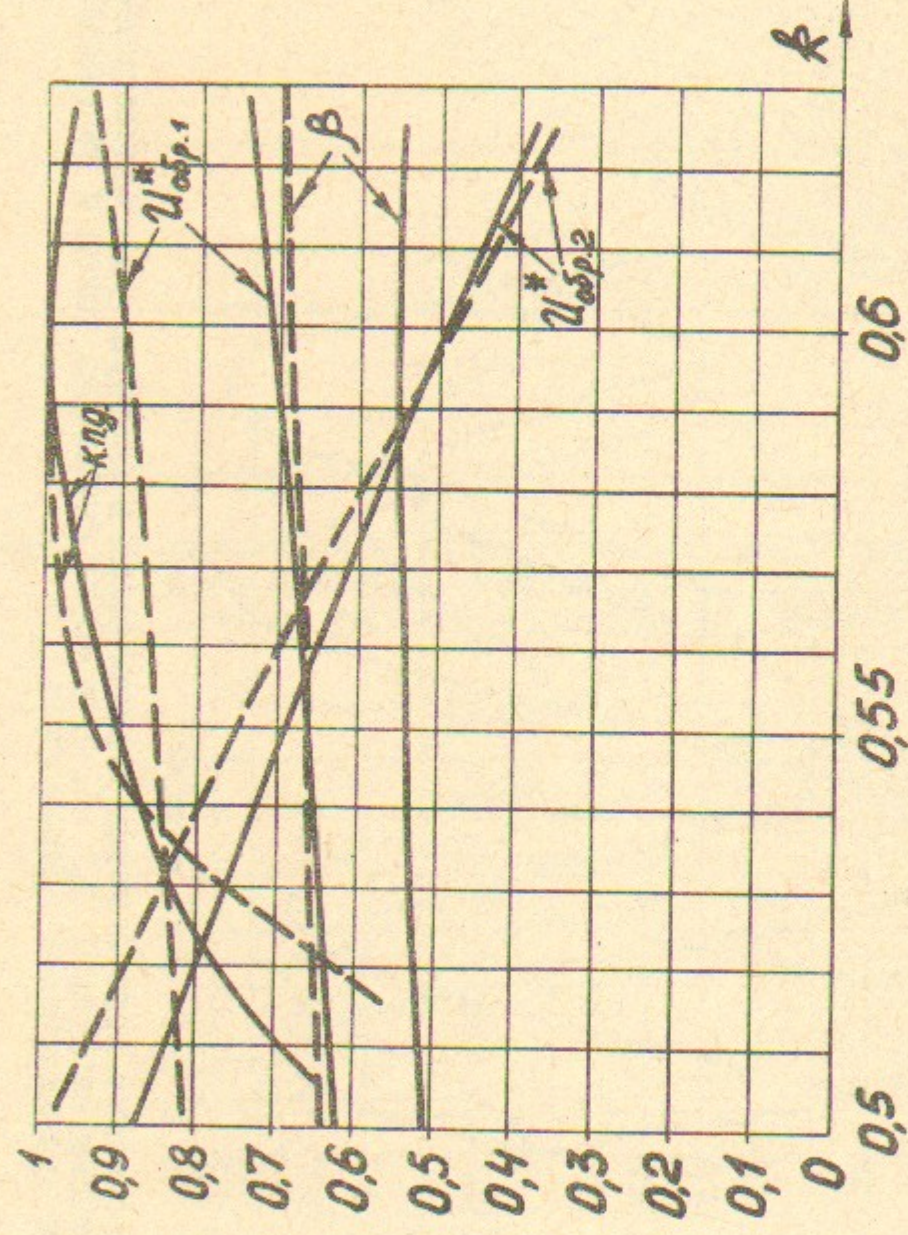


Рис. 13. Зависимости амплитуд первой (U_{op1}^*) и второй (U_{op2}^*) полуволн обратного вторичного напряжения, коэффициента передачи энергии из емкости C_1 в нагрузку (β) и теоретического к.п.д. в режиме рекуперации при длительности импульса $\tau^* = 0,35$, $J_H^* = 0,5$ (сплошные кривые) и $J_H^* = 1$ (пунктирные кривые) в зависимости от коэффициента связи (k).

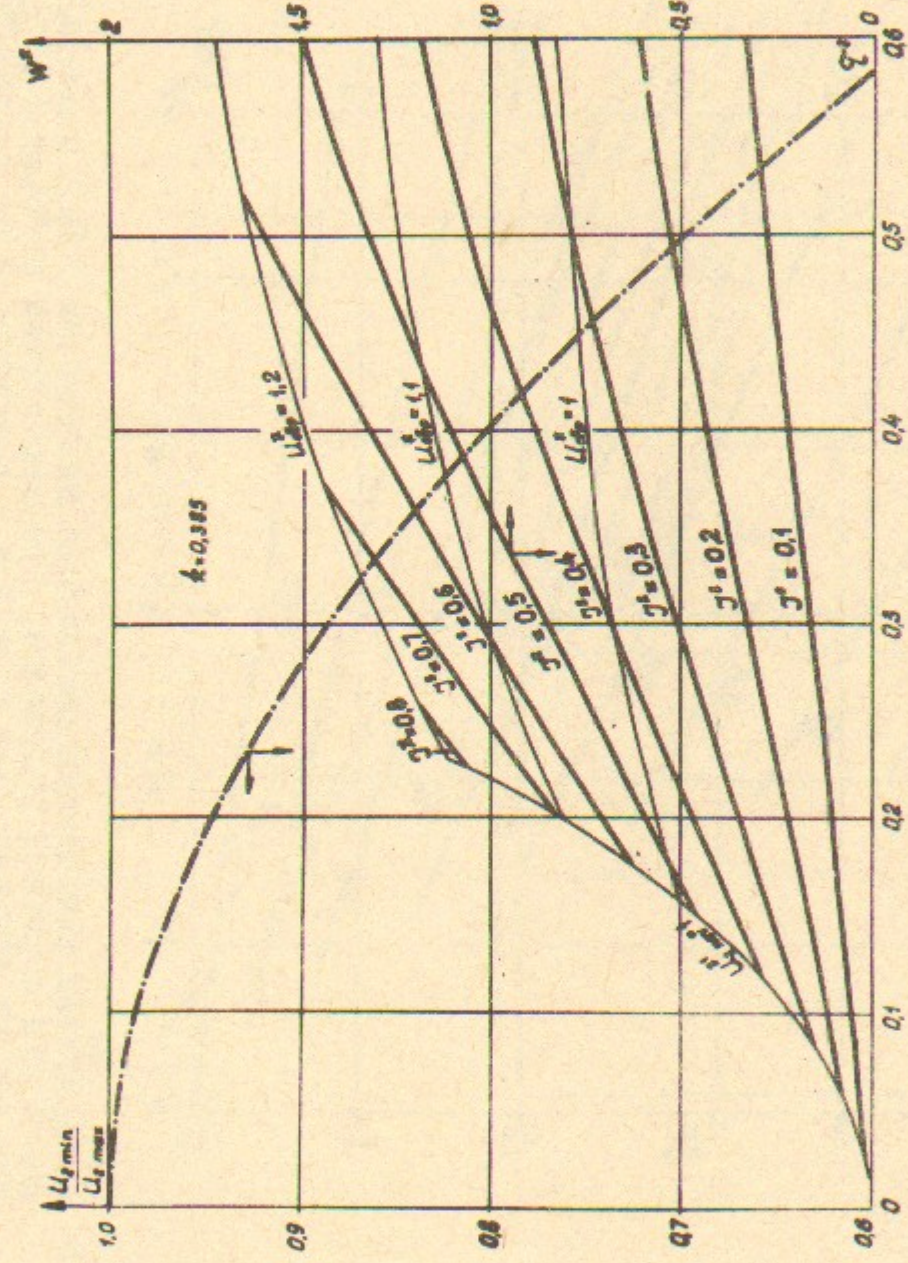


Рис. 14. Отношение минимального напряжения в период протекания тока нагрузки к максимальному для режима прямоугольного импульса тока (пунктирная кривая) и уносимая энергия в зависимости от длительности импульса для различных величин тока (сплошные кривые), $k = 0,385$.

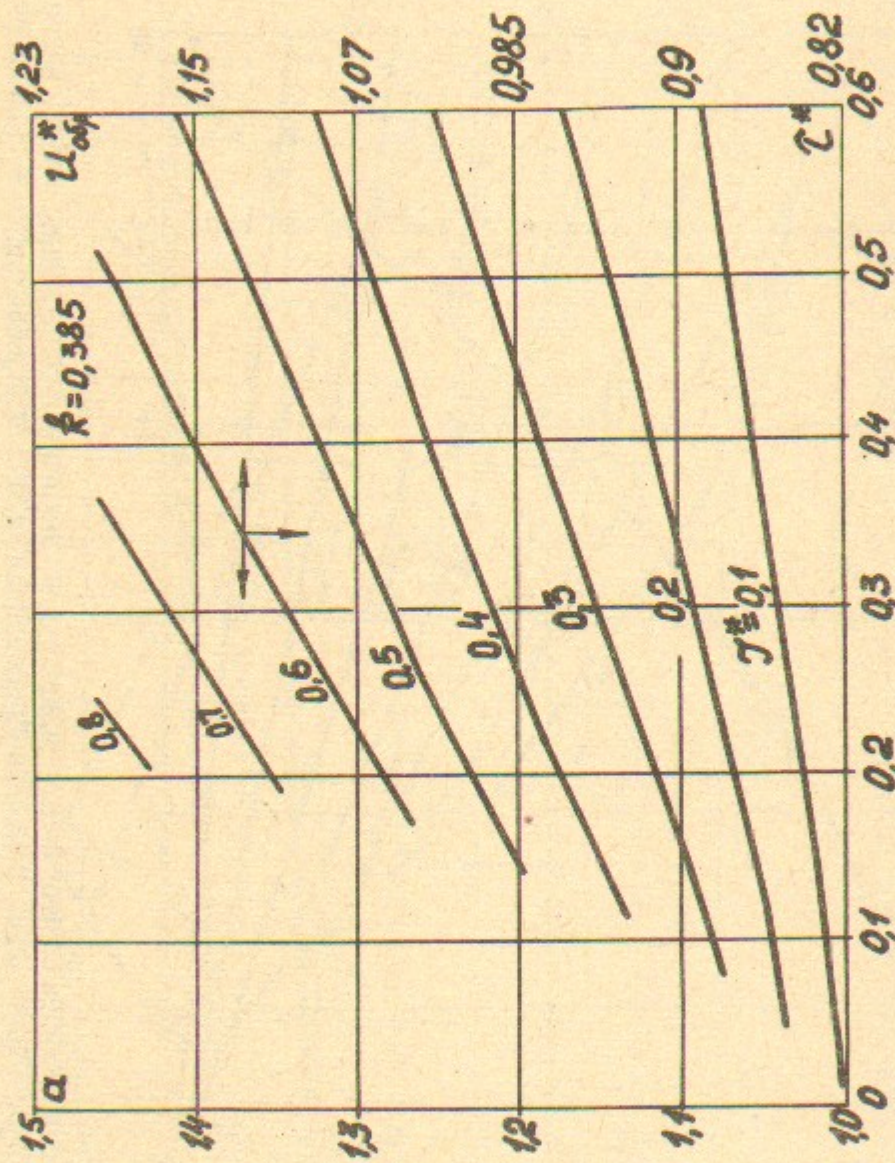


Рис. 15. Коэффициент увеличения первичного напряжения (α) и величина амплитуды обратной полуволны, предшествующей рабочей (U_{0}^*) для разных величин тока нагрузки в зависимости от длительности импульса, $k = 0,385$.

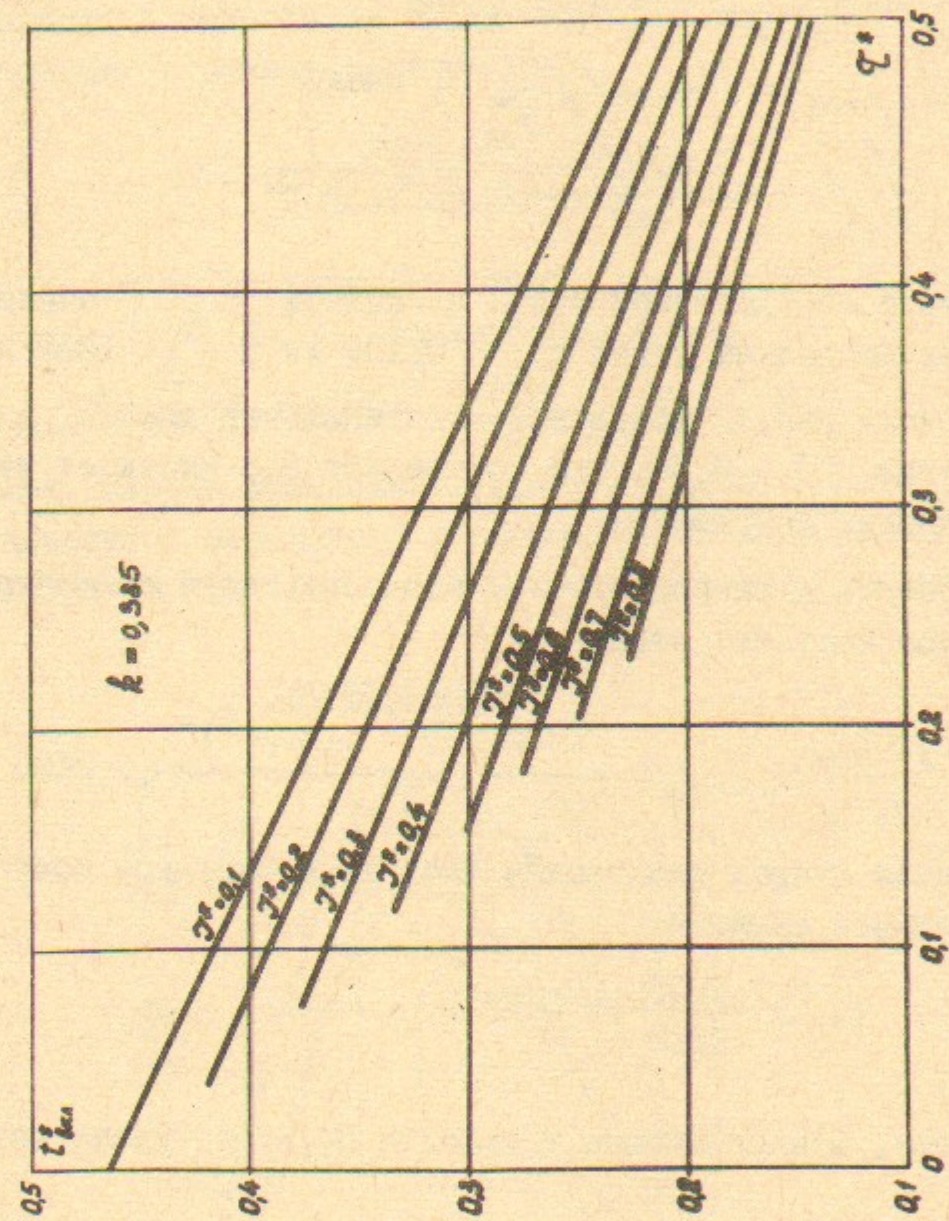


Рис. 16. Оптимальный момент времени включения прямоугольного импульса тока нагрузки, отсчитываемый от начала рабочей полуволны напряжения, $k = 0,385$.

дает значение $L_1 C_1 = L_2 C_2 = 1,81 \cdot 10^{-10}$ Гн.Ф.

3) Амплитуда обратной полуволны напряжения U_2 была принята равной $0,7^*$ от U_{2max} , т.е. $U_{обр.1}^* = 0,7$. Из рис. 9 при этом имеем $a = 1,24$; $J_H^* = 0,52$. Следовательно, единица тока в элементах вторичного контура составляет величину

$$J_{2max} = 100/0,52 = 192 \text{ А}$$

Так как $J_{2max} = U_{2max} / \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$, имеем

$$\sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = \frac{2 \cdot 10^6}{192} = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Ом}$$

Вместе с определенной в п.2 величиной $L_2 C_2$ последнее соотношение позволяет найти $L_2 = 0,139$ Гн и $C_2 = 1300$ пФ.

По кривым рис. 10 можем найти оптимальный момент включения тока нагрузки $t_i^* = 0,26$, что составляет 9,3 мксек от начала рабочей полуволны напряжения.

4. Проектная энергоемкость высоковольтного накопителя (она же - единица энергии) равна

$$\frac{C_2 U_{2max}^2}{2} = W_{eg} = \frac{1300 \cdot 10^{-12} \cdot (2 \cdot 10^6)^2}{2} = 2600 \text{ Дж}$$

Уносимая пучком электронов энергия в импульсе составляет в относительных единицах

$$W^* = \frac{2000}{2600} = 0,77.$$

Энергия, накапливаемая в емкости C_1 , (без учета потерь в контурах)

$$W_1' = 2600 \cdot 1,24^2 = 4000 \text{ Дж}$$

С учетом эффективности трансформатора (\mathcal{K}), которая в ускорителях ИЯФ при $\mathcal{K} = 0,6$ обычно составляет величину около 0,9,

$$W_1 \approx 4,5 \text{ кДж.}$$

*) Детальное обсуждение соображений, определяющих выбор допустимой величины обратного напряжения, выходит за рамки настоящей работы. Этот вопрос, а также возможность обеспечения достаточно высокой монохроматичности пучка ускоренных электронов рассматриваются в работе /31/.

Коэффициент передачи энергии W_1 в нагрузку составляет около 45%. Возможный к.п.д. ускорителя η в режиме рекуперации при $\mathcal{K} = 0,9$ можно оценить следующим образом. Потери энергии до импульса тока нагрузки составляют приблизительно $0,1 W_1 = 450$ Дж. Оставшаяся в контурах трансформатора энергия после прекращения тока нагрузки равна $4500 - 2000 - 450 \approx 2000$ Дж. К моменту возвращения энергии в емкость C_1 будет потеряно около $0,1 \cdot 2000 = 200$ Дж. Таким образом, в режиме рекуперации

$$\eta \approx \frac{2000}{2000 + 450 + 200} = 0,75.$$

5) Параметры первичного контура проще всего определить, используя выражение (I-16), из которого имеем

$$J_{1max} \cdot U_{10} = 13,6 \cdot 4500 \cdot 1,8 \cdot 10^3 = 7,2 \cdot 10^8 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Далее, выбрав соотношение между U_{10} и J_{1max} из условий работы элементов первичного контура, легко определить C_1 (энергия известна) и L_1 (по известной собственной частоте контуров).

Диодный режим

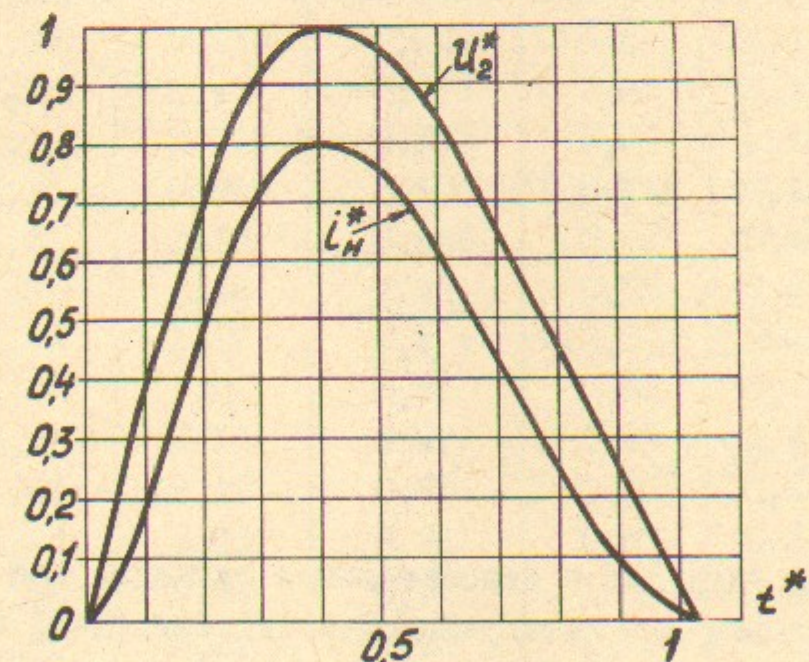


Рис. 17. Расчетные кривые рабочей полуволны U_2 и нагрузочного тока (при $J_{Hmax}^* = 0,8$) в диодном режиме нагрузки. $\mathcal{K} = 0,6$; показана только 2-я полуволна напряжения U_2 .

В этом режиме в течение времени действия рабочей полуволны напряжения ток нагрузки пропорционален напряжению в степени 3/2. Осуществление диодного режима не требует специальной системы управления током пучка заряженных частиц, и поэтому в некоторых случаях несмотря на очевидные недостатки такого режима он применяется в ускорителях.

Дифференциальные уравнения для токов и напряжений в контурах в период действия рабочей полуволны напряжения при $i_H = \rho U^{3/2}$ в соответствии с рис. I имеют вид:

$$\begin{aligned} U_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \\ U_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}, \\ i_1 &= -C_1 \frac{dU_1}{dt}, \\ i_2 &= -C_2 \frac{dU_2}{dt} - \rho U_2^{3/2}. \end{aligned}$$

При переходе к относительным единицам (тем же, что и для режима прямоугольного импульса тока) для $k = 0,6$ получаем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_1^*}{dt^*} &= -i_1^* \\ \frac{dU_2^*}{dt^*} &= -i_2^* - \gamma U_2^{*3/2} \\ \frac{di_1^*}{dt^*} &= 1,56(U_1^* - 0,6 \cdot U_2^*) \\ \frac{di_2^*}{dt^*} &= 1,56(U_2^* - 0,6 \cdot U_1^*) \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-5})$$

где γ - ток нагрузки в относительных единицах при $U_2 = U_{2max}$. Начальные условия для интегрирования системы (II-5) получаем из уравнений х.х. (I-9)-(I-12) для момента времени $t = T_{cb}/2$ (конец первой полуволны напряжения) при $U_{10} = a \cdot U_{10(x.x)}$, где a - коэффициент увеличения первичного напряжения при нагрузке. В относительных единицах для системы (II-5) при $t^* = 0$

$$U_1^* = -\frac{a}{2}; \quad U_2^* = 0; \quad i_1^* = -0,342 \cdot a; \quad i_2^* = 1,027 \cdot a.$$

Система (II-5) интегрировалась численно методом Рунге-Кутты (РК4) на ЭВМ для различных значений $\gamma = \gamma_{kmax}^*$ (от 0,1 до 1,5). Результаты расчета приведены в таблице 3, в которой:

- W^* - энергия в относительных единицах, уносимая током нагрузки;
- β - коэффициент передачи энергии из первичной емкости в нагрузку;
- $U_{обр}^*$ - амплитуда напряжения обратной полуволны, предшествующей рабочей, в долях максимального рабочего напряжения (U_{2max});
- Δt_{max}^* - время достижения максимального напряжения от начала рабочей полуволны в долях её длительности при х.х. ($T_{cb}/2$);
- $t_{нош}^*$ - длительность рабочей полуволны напряжения в тех же единицах.

Таблица 3

γ_{kmax}^*	a	W^*	β	$U_{обр}^*$	Δt_{max}^*	$t_{нош}^*$
0,1	1,07	0,239	0,209	0,6	0,49	1
0,2	1,13	0,477	0,373	0,64	0,47	1
0,3	1,19	0,712	0,503	0,67	0,46	1
0,4	1,25	0,945	0,605	0,71	0,45	1
0,5	1,31	1,18	0,685	0,74	0,44	1
0,6	1,38	1,45	0,75	0,79	0,43	1,01
0,7	1,45	1,68	0,8	0,82	0,42	1,01
0,8	1,51	1,91	0,84	0,85	0,41	1,02
0,9	1,57	2,13	0,87	0,89	0,4	1,03
1,0	1,65	2,42	0,89	0,93	0,39	1,04
1,1	1,71	2,65	0,91	0,97	0,38	1,05
1,2	1,79	2,94	0,92	1,01	0,38	1,06
1,3	1,85	3,17	0,93	1,05	0,37	1,07
1,4	1,93	3,47	0,93	1,09	0,37	1,08
1,5	1,99	3,7	0,94	1,12	0,36	1,1

Анализ данных, приведенных в таблице 3, (см. также рис. I7) показывает, что с ростом $U_{чмк}^*$ форма кривой U_2 заметно искажается: максимальное напряжение смещается к началу полуволны, а её длительность несколько возрастает. К.п.д. режима может достигать высоких значений.

ЛИТЕРАТУРА

- I. G.D.Crags and G.M.Meek. High Voltage Laboratory Tecknik, London, 1954.
2. W.Heise. "Elektrotechnische Zeitschrift", A-1, 7, 1964.
3. D.Finkelstein, P.Goldberg, J.Shuchatovitz. "Review of Scientific Instruments", 37, № 2, 159, 1966 (в русском переводе - "Приборы для научных исследований").
4. G.Breit and M.A.Tuve. "Nature", 121, 535, 1928.
5. M.A.Tuve, L.R.Hafstad and O.Dahl. "Phys. Review", 36, 1261(L) 1930.
6. Л.В.Мысовский, УФН, 10, 545, 1930.
7. А.С.Папков. ЖЭТФ, 5, 375, 1935.
8. W.Kossel und A.Eckardt, "Annalen der Phys",., 5.Folge, Band 17, 543, 1933.
9. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.А.Гапонов, Г.С.Крайнов, Ускоритель заряженных частиц, Авторское свидетельство № 224712, "Бюллетень изобретений", № 26, 1968.
10. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, И.В.Казарезов, В.Ф.Куценко, В.М.Радченко, Перенапряжения в высоковольтном импульсном ускорителе. Препринт ИЯФ 48-71, Новосибирск, 1971.
11. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, С.Ф.Воропаев, В.А.Гапонов, В.М.Долгушин, Г.С.Крайнов, Доклад на VI Межвузовской конференции по электронным ускорителям. Томск, февраль 1966 г., Сборник "Электронные ускорители", Москва, 1968, стр.358.
12. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, А.А.Егоров, В.С.Панасюк, Н.В.Шустров, там же, стр. 365.
13. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман "Атомная энергия", 23, вып.1, 44, 1967.
14. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, А.А.Егоров, И.В.Казарезов, А.В.Филипченко, Г.И.Яснв. Доклад на VII Межвузовской конференции по электронным ускорителям. Томск, сентябрь 1968, Сборник "Электронные ускорители", 1970 г., вып.3, стр.36.
15. С.Б.Вассерман, И.В.Казарезов, В.Ф.Куценко, В.М.Радченко, Н.Г.Хавин, Б.И.Ястреба. Доклад на IV Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Москва, ноябрь, 1974г. Труды Совещания, 1976г. т,1, стр.285.

16. Г.И.Будкер и др. Источник позитронов для накопителя ВЭШ-4, Доклад на У Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1976.
17. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, Л.А.Моркин, О.П.Печерский, В.А.Цукерман, ДАН СССР, 192, № 1, 76, 1970.
18. В.М.Лагунов, А.Г.Пономаренко, Л.П.Фоминский, ЖТФ, 42, вып. 9, 1947, 1972.
19. Э.Л.Бояринцев, В.А.Капитонов, В.А.Корнилов. ДАН СССР, 217, № 4, 808, 1974.
20. С.П.Бугаев, А.С.Елчанинов, Ф.Я.Загулов, Б.М.Ковальчук, Г.А.Месяц, Ю.Ф.Поталицын. В сборнике "Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов", Новосибирск, 1974, стр.113.
21. А.И.Павловский, Г.Д.Кулешов, А.И.Герасимов, Е.Г.Дубинов, Д.И.Зенков, А.П.Клементьев, В.О.Кузнецов, В.А.Тананакин, А.Д.Тарасов, В.П.Царев, ПТЭ, № 5, 20, 1976.
22. I. Boscolo, G. Brautti, R. Coisson, M. Leo, A. Luches. "Review of Scientific Instr", 46, No.11 1535, 1975.
23. C.R.G. Hoffman. "Review of Scientific Instr". 46, No.1, 1, 1975.
24. G.I. Rohwein. "IEEE Transactions on Nuclear Science", NS-22, No.3, 1013, 1975.
25. И.С.Гоноровский. Основы радиотехники, Москва, 1957, стр.325.
26. С.Б.Вассерман, Диссертация, Новосибирск, 1967.
27. Б.П.Асеев. Основы радиотехники, Москва, 1947, стр.178.
28. В.L.Goodlet. "J.Institut Elect. Eng". 74, 377, 1934.
29. Е.А.Абрамян, В.А.Гапонов. "Атомная энергия", 20, вып.5, 385, 1966.
30. С.М.Мезенцев, В.И.Михайлов, С.В.Наек. ПТЭ, № 6, 14, 1974.
31. Г.И.Будкер, С.Б.Вассерман, И.И.Глазков, И.В.Казарезов, Е.Н.Кокин, Г.С.Крайнов, В.М.Радченко, Н.И.Сапутин, Б.И.Ястреба. Высоковольтный импульсный генератор электронного пучка с энергией в импульсе 2 кДж. Препринт ИЯФ СО АН СССР (в печати).

Работа поступила - 27 сентября 1977 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
 Подписано к печати II.XI-1977 г. МН 03053
 Усл. 2,6 печ.л., 2,1 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно
 Заказ № 110.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР