

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1086
183

281
12-83
13-82 775

В.Д.Аксиненко, Е.А.Дементьев,
Н.И.Каминский, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин

МНОГОКОНТУРНАЯ СХЕМА
ИМПУЛЬСНОГО ЗАРЯДА ФОРМИРУЮЩИХ ЛИНИЙ
ДЛЯ ПИТАНИЯ СТРИМЕРНЫХ КАМЕР

Направлено в журнал "Приборы и техника
эксперимента"

1982

В работе /1/ предложена двухконтурная схема импульсного заряда формирующих линий /ФЛ/, позволяющая уменьшить влияние недостатков схемы на базе импульсного трансформатора /ИТ/ без сердечника, а именно: 1/ уменьшить значение коэффициента электромагнитной связи между индуктивностями и 2/ уменьшить амплитуду первого максимума зарядного напряжения ФЛ.

Однако указанные преимущества предложенной схемы, как показывает проведенный анализ ее работы /2/, существенны лишь при небольших коэффициентах трансформации, равных 3 - 5.

Увеличить значение коэффициента трансформации при сохранении основных преимуществ /малые значения амплитуды первого максимума напряжения и, особенно, коэффициента электромагнитной связи/ позволяет предлагаемая многоконтурная схема импульсного заряда /3/ ФЛ, анализ работы которой приводится ниже.

Принципиальные электрические схемы импульсного заряда ФЛ /трехконтурной - а и многоконтурной - б/ приведены на рис. 1.

Для пояснения принципа действия многоконтурной схемы рассмотрим работу трехконтурной схемы.

Здесь в исходном состоянии накопительные емкости C_1, C_2 и C_0 заряжены от источника постоянного напряжения через зарядные резисторы R_1 и R_2 до напряжения U_1 . При замыкании коммутатора K они разряжаются через индуктивности L_1, L_2 и L_3 , имеющие между собой электромагнитную связь. На емкости нагрузки C_H /емкость ФЛ/ выделяется импульс напряжения $U_H(t)$, максимальная амплитуда которого зависит от соотношений элементов схемы.

Исходные уравнения для переходного процесса в схеме в операторной форме по Лапласу могут быть представлены в виде /при ана-

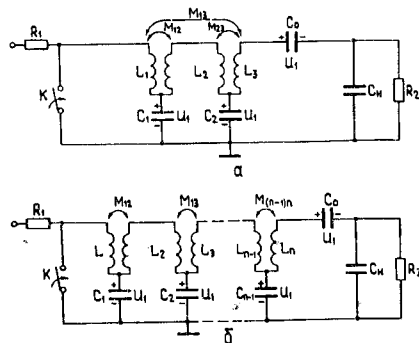


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема импульсного заряда ФЛ: а/ трехконтурная, б/ многоконтурная.

лизе зарядным резистором R_2 пренебрегаем из-за большой его величины, не влияющей на процесс разряда/:

$$\bar{i}_1(pL_1 + \frac{1}{pC_1}) - \bar{i}_2(\frac{1}{pC_1} - pM_{12}) + \bar{i}_3 pM_{13} = \frac{U_1}{p}$$

$$-\bar{i}_1(\frac{1}{pC_1} - pM_{12}) + \bar{i}_2(pL_2 + \frac{1}{pC_2^*}) - \bar{i}_3(\frac{1}{pC_2} - pM_{23}) = 0 \quad /1/$$

$$\bar{i}_1 pM_{13} - \bar{i}_2(\frac{1}{pC_2} - pM_{23}) + \bar{i}_3(pL_3 + \frac{1}{pC_3^*}) = 0,$$

M_{12}, M_{23} и M_{13} - взаимные индуктивности между первым и вторым, вторым и третьим, первым и третьим контурами соответственно;

$$C_2^* = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}; C_3^* = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}, \quad \text{здесь } C_3 = \frac{C_0 C_H}{C_0 + C_H}.$$

Напряжение на емкости нагрузки равно

$$\bar{U}_H = \bar{i}_3 / p C_H = \frac{\Delta_3}{\Delta} \frac{1}{p C_H}, \quad /2/$$

где Δ и Δ_3 - определители системы уравнений /1/.

Система уравнений /1/ имеет аналитическое решение при равенстве частот контуров, т.е. при условии

$$L_1 C_1 = L_2 C_2^* = L_3 C_3^* \quad /3/$$

и при следующих допущениях:

$$1) k_{12} = k_{23} = k; \quad 2) k_{C12}^2 = k_{C13}^2 = k_C.$$

где $k_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$ - коэффициент индуктивной связи между первым и вторым контурами; $k_{23} = \frac{M_{23}}{\sqrt{L_2 L_3}}$ - коэффициент индуктивной связи между вторым и третьим контурами; $k_{C12} = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$ - коэффициент емкостной связи между первым и вторым контурами; $k_{C13} = \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2)(C_2 + C_3)}$ - коэффициент емкостной связи между первым и третьим контурами.

Из условия резонанса /3/ следует, что

$$N^2 = \frac{1}{k_C^2} \quad \text{и} \quad n = N^2 - 1,$$

где $N = \sqrt{L_2 / L_1}$, а $n = \sqrt{\frac{C_1 + C_2 + C_0}{C_H}}$ - коэффициент трансформации схемы.

Учитывая указанные допущения и условие резонанса, проведя соответствующие преобразования, можно найти

$$\Delta = \frac{n^2 N^2 L_1^3 (1 - k_1)(1 + k_1 - 2k^2)}{p^3} \left[\left(p^2 + \frac{w_0^2}{1 - k_1} \right) (p^4 + 2Ap^2 + B) \right], \quad /4/$$

$$\Delta_3 = \frac{U_1 (1 - p^2 M_{12} C_1)^2}{p^3 C_1 C_2} - \frac{U_1 M_{13} (L_2 C_2^* p^2 + 1)}{p C_2^*}. \quad /5/$$

Здесь $k_1 = \frac{M_{13}}{\sqrt{L_1 L_3}}$ - коэффициент электромагнитной связи между первым и третьим контурами; $w_0^2 = \frac{1}{L_1 C_1} = \frac{1}{L_2 C_2^*} = \frac{1}{L_3 C_3^*}$ - резонансная

частота; $A = w_0^2 \frac{1 + 0,5k_1 + 2kk_c}{1 + k_1 - 2k^2}$ и $B = \frac{1 - 2k_c^2}{1 + k_1 - 2k^2} \cdot w_0^4$.

Корни характеристического уравнения будут

$$p_{1,2}^2 = -w_1^2 = \frac{w_0^2}{1 - k_1}, \quad p_{3,4}^2 = -w_2^2 = A - \sqrt{A^2 - B}, \quad p_{5,6}^2 = -w_3^2 = A + \sqrt{A^2 - B}.$$

Подставив выражения /4/ и /5/ в выражение /2/, возвратясь к исходной функции и проведя преобразования, получим выражение для напряжения на емкости нагрузки

$$U_H(t) = \frac{n}{n+1} U_1 (1 + A_1 \cos w_1 t - A_2 \cos w_2 t - A_3 \cos w_3 t),$$

где

$$A_1 = A_0 \frac{w_0^6 / w_1^2 + 2kNw_0^4 + k^2 N^2 w_0^2 w_1^2 + k_1 n (w_0^4 - w_1^2 w_0^2)}{(w_1^2 - w_2^2)(w_3^2 - w_1^2)},$$

$$A_2 = A_0 \frac{w_0^6 / w_2^2 + 2kNw_0^4 + k^2 N^2 w_0^2 w_2^2 + k_1 n (w_0^4 - w_2^2 w_0^2)}{(w_1^2 - w_2^2)(w_3^2 - w_2^2)},$$

$$A_3 = A_0 \frac{w_0^6 / w_3^2 + 2kNw_0^4 + k^2 N^2 w_0^2 w_3^2 + k_1 n (w_0^4 - w_3^2 w_0^2)}{(w_3^2 - w_1^2)(w_3^2 - w_2^2)},$$

здесь

$$A_0 = \frac{(1 - 2k_c^2)}{(1 - k_1)(1 + k_1 - 2k^2)}.$$

Видно, что напряжение на емкости нагрузки $U_H(t)$ является суперпозицией трех типов колебаний с частотами w_1, w_2 и w_3 . Очевидно, что максимального значения $U_H(t)$ может достигнуть, когда частоты между собой относятся как небольшие целые числа, т.е. при условии

$$w_3 : w_1 : w_2 = 3 : 2 : 1. \quad /7/$$

Условие /7/ выполняется при определенных значениях коэффициентов электромагнитной связи k_1 и k , причем эти значения зависят от коэффициента трансформации схемы n . На рис. 2 приведен график этих зависимостей /кривые 3 и 4 для k и k_1 соответственно/. Видно, что требуемые значения коэффициентов электромагнитной связи в предложенной схеме меньше, чем в двухконтурной /кривая 2/ и заметно меньше, чем в схеме ИТ /прямая 1/, особенно при значениях коэффициентов трансформации, равных $4 \div 8$. С одной стороны, требуемый дополнительный коэффициент электромагнитной связи между первой и третьей индуктивностями k_1 усложняет настройку схемы на полную передачу энергии, однако, с другой стороны, значения его невелики при реальных коэффициентах трансформации n и возможен такой режим работы схемы, когда $k_1 = 0$, например, при $n = 3, 2, 3$.

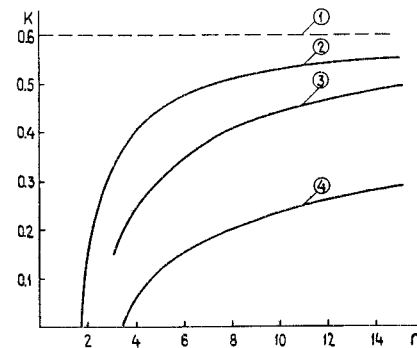


Рис. 2. Зависимость коэффициента электромагнитной связи от коэффициента трансформации в схемах: 1/ - ИТ; 2/ - двухконтурной; 3/ и 4/ - трехконтурной.

Расчеты показывают, что максимальное напряжение на емкости нагрузки равно $U_{Hm} = nU_1$, т.е. происходит трансформация первичного напряжения в n раз. Время заряда емкости нагрузки до максимального напряжения при этом будет

$$t_3 = 2\pi \sqrt{L_1 C_1 (1 - k_1)}. \quad /8/$$

Схема обеспечивает максимальную передачу запасенной энергии в нагрузку при следующем выборе накопительных емкостей:

$$C_0 = n C_H; \quad C_2 = \frac{n(n-1)}{(n+1)} C_H; \quad C_1 = \frac{n^2(n-1)}{(n+1)} C_H.$$

Характерная форма напряжения на емкости нагрузки приведена на рис. 3 /кривая 3/ для значения n , равного 5. Для сравнения на этом рисунке приведены типичные формы напряжения на емкости нагрузки в схеме ИТ /кривая 1/ и в двухконтурной схеме /кривая 2/ при таком же значении коэффициента трансформации.

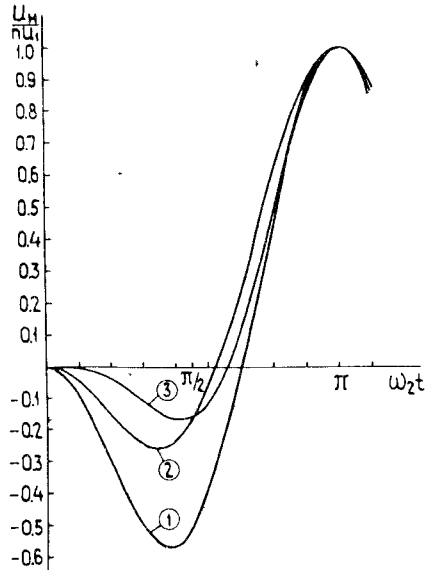


Рис. 3. Характерная форма напряжения на емкости нагрузки в схемах: 1/ - ИТ; 2/ - двухконтурной; 3/ - трехконтурной.

Представляет практический интерес сравнение времени заряда ФЛ до максимального напряжения t_3 в схемах ИТ, двухконтурной и трехконтурной схемах. Оценку t_3 в указанных схемах можно произвести по следующим формулам:

1/ для импульсного трансформатора

$$t_3 = \pi \sqrt{L_1 C_1} (1+k) = \pi \sqrt{1,6 L_1 C_H},$$

т.к. $C_1 = n^2 C_H$ и $k = 0,6$;

2/ для двухконтурной схемы

$$t_3'' = \pi \sqrt{L_1 C_1} (1+k) \frac{\pi}{(n-1)} = \pi \sqrt{1,6 L_1 C_H} \frac{(n-1)}{(n-0,6)},$$

т.к. $C_1 = n(n-1) C_H$ и $k = \frac{0,6n-1}{n-0,6}$;

3/ для трехконтурной схемы

$$t_3''' = 2\pi \sqrt{L_1 C_1} (1-k_1) = \pi \sqrt{4 L_1 C_H} (1-k_1) \frac{(n-1)}{(n+1)},$$

т.к. $C_1 = \frac{n^2(n-1)}{(n+1)} C_H$, значение $k_1 = f(n)$ можно определить по графику на рис. 2 /кривая 4/.

Сравнение можно провести при одинаковых значениях емкости нагрузки C_H и одинаковых значениях коэффициентов трансформации n . При таком условии возможны два критерия сравнения.

Первый. Для уменьшения t_3 при известной емкости нагрузки C_H необходимо уменьшать значение первичной индуктивности L_1 . Однако из практических соображений выбор значения L_1 диктуется условием, при котором влияние индуктивности подводящих цепей на эффективные значения коэффициентов электромагнитной связи и трансформации должно быть незначительным /значение первичной индуктивности должно быть как минимум на порядок больше индуктивности подводящих цепей/. Тогда при одинаковых значениях L_1 в указанных схемах время заряда емкости нагрузки в двухконтурной и трехконтурной схемах импульсного заряда ФЛ по сравнению с t_3 в схеме ИТ будет:

$$t_3'' = \sqrt{\frac{n-1}{n-0,6}} t_3 \approx 0,98 t_3$$

и

$$t_3''' = \sqrt{2,5(1-k_1)} \frac{(n-1)}{(n+1)} t_3 \approx 1,245 t_3$$

при $n=10$, т.е. при таком критерии сравнения t_3 в двухконтурной схеме немного меньше, а в трехконтурной схеме больше, чем t_3 в схеме ИТ.

Второй. Более строгое сравнение времен заряда ФЛ будет при идентичных условиях работы коммутатора в указанных схемах. Извест-

Видно, что рассматриваемая схема формирует меньшую амплитуду первого максимума напряжения, причем значение этой амплитуды зависит от коэффициента трансформации схемы. График этой зависимости /амплитуда первого максимума, отнесенная к амплитуде второго/ приведен на рис. 4 /кривая 3/.

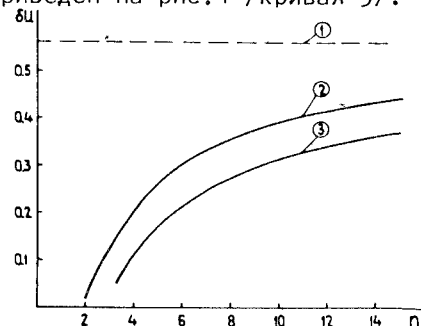


Рис. 4. Относительная амплитуда первого максимума напряжения в зависимости от коэффициента трансформации в схемах: 1/ - ИТ; 2/ - двухконтурной; 3/ - трехконтурной.

но, что при одноискровой коммутации в газе максимальная крутизна тока через коммутатор ограничена значением 10^{13} А/с. Из этого ограничения можно определить минимальное значение первичной индуктивности, а затем сравнить минимальные времена заряда ФЛ, которые могут быть в схемах при одноискровой коммутации. Сравнение t_3 проведем по средней крутизне тока через коммутатор

$$i'_{1cp} = \frac{i_{1m}}{t_m},$$

где i_{1m} - максимальное значение тока через коммутатор, t_m - время до максимума тока.

Для схемы ИТ

$$i'_{1cp} \approx \frac{U_1}{L_1} \leq 10^{13} \text{ А/с.}$$

Отсюда

$$L_1 \geq \frac{U_1}{i'_{1cp}} \geq \frac{U_{Hm}}{n i'_{1cp}}$$

и

$$t'_3 \geq \pi \sqrt{1,6 C_H n} \frac{U_{Hm}}{i'_{1cp}}$$

Для двухконтурной схемы

$$i'_{1cp} = m \frac{U_1}{L_1} < 10^{13} \text{ А/с.}$$

где $m < 1$ - коэффициент, зависящий от коэффициента трансформации. Например, $m = 0,61$; $0,79$; и $0,88$ при $n = 1,66$; 5 и 10 соответственно, т.е. $m \rightarrow 1$ при $n \rightarrow \infty$.

Отсюда

$$L_1 \geq m \frac{U_1}{i'_{1cp}} \geq m \frac{U_{Hm}}{i'_{1cp}}$$

и

$$t'_3 > \pi \sqrt{1,6 C_H n} \frac{U_{Hm}}{i'_{1cp}} m \frac{(n-1)}{(n-0,6)} \geq 0,92 t'_3 \quad \text{при } n = 10.$$

Для трехконтурной схемы

$$i'_{1cp} = \frac{m U_1}{L_1} \leq 10^{13} \text{ А/с.}$$

где $m = f(n)$, например, $m = 0,64$; $0,69$ и $0,78$ для $n = 3,23$; 5 и 10 соответственно.

Отсюда

$$L_1 \geq m \frac{U_1}{i'_{1cp}} \geq m \frac{U_{Hm}}{n i'_{1cp}}$$

и

$$t'''_3 \geq \pi \sqrt{4 C_H n} \frac{U_{Hm}}{i'_{1cp}} m (1 - k_1) \frac{(n-1)}{(n+1)} \geq 1,1 t'_3$$

при $n = 10$.

И при таком критерии сравнения t_3 в двухконтурной схеме меньше, а в трехконтурной больше, чем в схеме ИТ при реальных n .

Итак, трехконтурная схема импульсного заряда ФЛ обеспечивает полную передачу энергии и повышение напряжения заряда ФЛ в n раз с меньшей амплитудой первого максимума напряжения и меньшими значениями коэффициента связи между индуктивностями. Преимущества трехконтурной схемы особенно заметны при $n = 4 \div 8$. Поэтому такую схему целесообразно применять как промежуточную ступень между генератором Аркадьева-Маркса и ФЛ с целью их согласования и повышения напряжения заряда ФЛ.

С целью дальнейшего уменьшения амплитуды первого максимума напряжения и коэффициентов электромагнитной связи между индуктивностями при увеличении коэффициента трансформации необходимо увеличивать число контуров схемы.

На рис. 1а приведена схема импульсного заряда ФЛ с n -контурами. Принцип ее работы аналогичен рассмотренному. Величина напряжения на емкости нагрузки определяется коэффициентом трансформации схемы, равным корню квадратному из отношения суммы накопительных емкостей к емкости нагрузки или из отношения индуктивности n -го контура к индуктивности первого контура. Максимальная передача накопленной энергии в емкость нагрузки происходит при определенных значениях коэффициентов электромагнитной связи между индуктивностями и равенстве частот в контурах, образованных индуктивностями и последовательным соединением емкостей, входящими в контуры. Равенство частот в контурах схемы происходит при выборе значения $C_0 = n C_H$, где n - коэффициент

трансформации, и выборе значений дополнительных накопительных емкостей из следующего выражения:

$$C_n = \frac{C_{n-1}}{\frac{1}{k_c^2 (1 + C_{n-1} / C_{n-2})} - 1}$$

где $k_c^2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \text{const}$, $n=2,3,4,\dots$ и $C_{n-2} = \infty$ при $n=2$.

Коэффициенты электромагнитной связи между индуктивностями выбираются по максимальному напряжению на емкости нагрузки, т.е. когда результирующие частоты переменных составляющих выходного напряжения /число результирующих частот равно числу контуров схемы/ относятся как небольшие целые числа. Наименьшие значения амплитуды первого максимума напряжения и коэффициентов электромагнитной связи получаются при равенстве коэффициента трансформации числу контуров схемы. Следует заметить, что с ростом числа контуров схемы увеличивается время заряда емкости нагрузки до максимального напряжения, что является особенностью формирующе-трансформирующих цепей /4/. Усложняется и настройка схемы на максимальную передачу энергии из-за дополнительных коэффициентов электромагнитной связи. Но зато уменьшается доля запасаемой энергии на последующих дополнительных емкостях, и их роль может выполнять паразитная емкость дополнительных индуктивностей.

Моделирование трехконтурной схемы импульсного заряда ФЛ, проведенное на низком напряжении, показало хорошее совпадение с расчетными данными.

В заключение авторы выражают благодарность С.Б.Прибыткову за моделирование трехконтурной схемы, а также Н.С.Глаголевой и Н.Н.Нургожину за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матюшин А.Т., Матюшин В.Т. Авторское свидетельство СССР № 790150 от 23.12.80 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1980, №47; с. 257.
2. Аксиненко В.Д. и др. ОИЯИ, 13-82-764, Дубна, 1982.
3. Аксиненко В.Д. и др. Авторское свидетельство СССР №871311 от 7.10.81 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1981, №37, с. 280.
4. Литвиненко О.Н. Формирующе-трансформирующие цепи". "Советское радио", М., 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 ноября 1982 года

Аксиненко В.Д. и др.

13-82-775

Многоконтурная схема импульсного заряда формирующих линий для питания стримерных камер

Предложена многоконтурная схема импульсного заряда формирующих линий. Проведен анализ трехконтурной схемы импульсного заряда ФЛ, приведены графики, поясняющие принцип ее работы. Дано сравнение времени заряда ФЛ до максимального напряжения в схеме импульсного трансформатора без сердечника, в двухконтурной /1/ и трехконтурной схемах импульсного заряда ФЛ. Дана рекомендация по применению трехконтурной схемы в высоковольтных установках.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Aksinenko V.D. et al.

13-82-775

Multisection Circuit to Charge the Impulse Forming Lines for Streamer Chamber Felding

A multisection circuit to charge the impulse forming lines (IFL) is proposed. Threesection circuit to charge IFL is analysed, its diagrams are presented. IFL time of charge up to maximum voltage in impulse resonance transformer without a core, in the twosection and threesection ones are compared. Recommendation for using the threesection circuit in high voltage installation is given.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint In