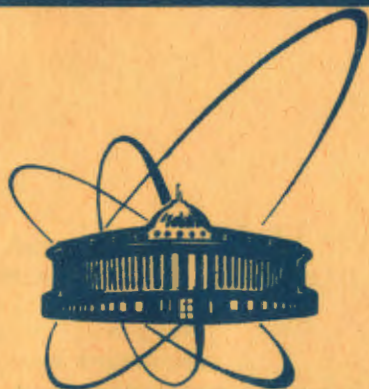


е 7



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

1950/83

18/4-83

13-83-37

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

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СХЕМ
ИМПУЛЬСНОГО ЗАРЯДА ФОРМИРУЮЩИХ ЛИНИЙ
В СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ СТРИМЕРНЫХ КАМЕР

1983

Для получения импульсов напряжения с амплитудой до 1 МВ и выше длительностью в единицы наносекунд используют, как правило, формирующие линии /ФЛ/: одиночные или двойные. Проведенный в /1/ анализ схем формирования высоковольтного импульса в системах питания стримерных камер показывает, что при прочих равных условиях время коммутации в простой формирующей линии в ~ 4 раза меньше, чем в двойной.

При указанных длительностях импульса емкость ФЛ небольшая /десятки пикофард/, и импульсный заряд ФЛ от генератора импульсных напряжений /ГИН/ Аркадьева-Маркса с бумажно-масляными конденсаторами через индуктивность /2/ становится неэффективным из-за небольшого коэффициента полезного действия /к.п.д./ зарядной цепи. Значительная часть запасенной энергии остается и рассеивается в ГИН, снижая долговечность составных его элементов. Повысить к.п.д. такой зарядной цепи ФЛ можно, используя в ГИН керамические конденсаторы с небольшой емкостью "в ударе", согласованной с емкостью ФЛ. Однако опыт эксплуатации генераторов на керамических конденсаторах показывает, что они ненадежны в работе и ресурс их работы небольшой /3/. Поэтому для реализации согласованного режима импульсного заряда ФЛ, обеспечивающего полную передачу энергии /без учета затуханий в зарядной цепи/ из ГИН или первичной накопительной емкости в емкость ФЛ, важно знать возможности передачи энергии тех или иных цепей импульсного заряда ФЛ. С целью оценки этих возможностей был проведен анализ различных эквивалентных схем зарядных цепей ФЛ.

В настоящей работе приводятся результаты этого анализа и дается сравнительная оценка схем импульсного заряда ФЛ с точки зрения их реализации в системе высоковольтного импульсного питания стримерного спектрометра.

Рассмотренные эквивалентные схемы цепей импульсного заряда ФЛ представлены в табл. 1, 2 и 3 /вторая графа/. В других графах таблиц даны основные параметры зарядовой цепи:

- $U_H / U_{Г(1)}$ - относительная амплитуда напряжения заряда ФЛ, равная отношению максимальной амплитуды напряжения заряда ФЛ (U_H) к амплитуде выходного напряжения зарядного генератора ($U_{Г}$) или к зарядному напряжению накопительной емкости (U_1);
- 7 - к.п.д. зарядной цепи, равный отношению максимальной энергии, запасенной в ФЛ при ее заряде,

Таблица 1

№ п/п	Эквивалентная схема	$\frac{U_{\text{кп}}}{U_{\text{Г}}}$	η	$T_{\text{н}}$	Примечание
1		0,5	0,25	$\sim 5R_3 C_N$	При $K_C = \frac{C_G}{C_G + C_N} = 0,5$
2		0,736	0,54	$T_3 + Z C_N$	При $\beta = \frac{Z C_G}{Z C_N} = 1$
3		0,87	0,736	$T_3 + 0,5 T_{\text{н}}$	При $C_N = C_G = 0,5 T_{\text{н}} / Z$
4		1	1	$\sqrt{L K_C C_N}$	При $K_C = \frac{C_G}{C_G + C_N} = 0,5$
5		0,83	0,69	$T_3 + 1,65 Z C_N$	При $Z = 1/4 \rho_{\text{н}}$ и $C_G = C_N$, где $\rho_{\text{н}} = \sqrt{L N / C_N}$
6		0,95	0,9	$T_3 + 1,08 T_{\text{н}}$	При $C_N = C_G = 0,5 T_{\text{н}} / Z$
7		0,995	0,905	$T_3 + 2,05 Z C_N$	При $Z = 1,17 \rho_{\text{н}}$, $\rho_{\text{н}} = 1,17 \rho_{\text{н}}$, $C_G = C_N$, где $\rho_{\text{н}} = \sqrt{L_G / C_G}$ и $\rho_{\text{н}} = \sqrt{L N / C_N}$

к максимальной энергии, накопленной в генераторе или накопительной емкости;

$T_{\text{н}}$ - время заряда ФЛ до максимального напряжения.

В примечании указаны условия, при которых достигаются перечисленные параметры зарядной цепи.

При анализе эквивалентных схем не учитывались затухание в зарядной цепи и потери в линии передачи.

В табл.1 приведены результаты анализа схем импульсного заряда ФЛ генератором импульсного напряжения с емкостью "в ударе" $C_{\text{Г}}$ или генератором с формирующей линией ($2U_{\text{Г}}$ - схема замещения генератора с ФЛ, формирующего прямоугольный импульс длительностью $T_{\text{н}} = 2Z C_{\text{Г}}$, где Z - внутренний импеданс генератора и $C_{\text{Г}}$ - его емкость/.

При импульсном заряде ФЛ с емкостью $C_{\text{Н}}$ через зарядный резистор R_3 от ГИН к.п.д. зарядной цепи в лучшем случае достигает 25% /схема 1/. При этом ФЛ заряжается за время $T_{\text{н}}$ до половины напряжения ГИН.

Таблица 2

№ п/п	Эквивалентная схема	$\frac{U_{\text{кп}}}{U_{\text{Г}}}$	η	$T_{\text{н}}$	Примечание
1		-1,92	-0,92	0,44	При $C_{\text{Г}} = L_{\text{Г}} = L_{\text{Н}} / C_{\text{Н}}$, где $C_{\text{Г}} = \frac{C_{\text{Г}} C_{\text{Н}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$, $L_{\text{Г}} = \frac{L_{\text{Г}} C_{\text{Г}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$, $L_{\text{Н}} = \frac{L_{\text{Н}} C_{\text{Н}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$
2		-1,61	-0,865	0,46	При $L_{\text{Г}} = L_{\text{Н}} = L_{\text{Н}} / C_{\text{Н}}$
3		2,7815	-0,86	0,57	При $L_{\text{Г}} = L_{\text{Г}} C_{\text{Г}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}}$, где $C_{\text{Г}} = \frac{C_{\text{Г}} C_{\text{Н}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$, $L_{\text{Г}} = \frac{L_{\text{Г}} C_{\text{Г}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$, $L_{\text{Н}} = \frac{L_{\text{Н}} C_{\text{Н}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$
4		-2,1	-0,787	0,59	При $L_{\text{Г}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}}$
5		-3,642	-0,83	0,77	При $L_{\text{Г}} C_{\text{Г}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}}$, где $C_{\text{Г}} = \frac{C_{\text{Г}} C_{\text{Н}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$, $L_{\text{Г}} = \frac{L_{\text{Г}} C_{\text{Г}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$, $L_{\text{Н}} = \frac{L_{\text{Н}} C_{\text{Н}}}{C_{\text{Г}} + C_{\text{Н}}}$
6		-2,542	-0,646	0,8	При $L_{\text{Г}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}}$
7		-2,344	-0,85	0,58	При $L_{\text{Г}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}} = L_{\text{Н}} C_{\text{Н}}$
8	Общие условия для схем 1-6: $C_{\text{Н}} = 0,5 \mu\text{Ф}$ и $L_{\text{Н}} = 20 \text{ мкГ}$; т.е. $Z_{\text{н}} = 200 \text{ Ом}$				

часто применяется в действующих высоковольтных установках. О недостатках этой схемы при ее применении в системах питания стримерных камер сказано выше.

Добавление в зарядную цепь индуктивности перед нагрузкой $L_{\text{Н}}$ /схемы 5 и 6/ позволяет улучшить согласование импедансов генератора и нагрузки: к.п.д. зарядной цепи увеличивается до 69% при импульсном заряде ФЛ от ГИН /схема 5/ и до 90% - при заряде от генератора с ФЛ /схема 6/. Соответственно увеличивается и относительная амплитуда зарядного напряжения ФЛ.

Введение в разрядную цепь ГИН индуктивности $L_{\text{Г}}$ приводит к увеличению к.п.д. зарядной цепи до ~91% и к увеличению относительной амплитуды зарядного напряжения ФЛ до ~0,95 /схема 7/. Увеличивается при этом и время заряда ФЛ. Отметим, что неизбежно присутствующая в реальных цепях паразитная индуктивность разрядного контура ГИН в данной схеме играет положительную роль, улучшая согласование импедансов генератора и нагрузки. При моделировании этой схемы импульсного заряда ФЛ, проведенном при низком напряжении и реальных значениях индуктив-

Замена зарядного резистора на линию передачи $Z, T_3 / z$ - импеданс линии передачи, T_3 - время ее задержки/ позволяет увеличить к.п.д. зарядной цепи до 54% при импульсном заряде ФЛ от ГИН /схема 2/ и до ~76% - при импульсном заряде от генератора с ФЛ /схема 3/. При этом относительная амплитуда зарядного напряжения ФЛ в схемах увеличивается, и ее значение равно ~0,74 и 0,87 для схем 2 и 3 соответственно. Однако увеличивается и время заряда ФЛ $T_{\text{н}}$ за счет времени задержки линии передачи T_3 .

При импульсном заряде ФЛ от ГИН через индуктивность L /схема 4/ можно получить полную передачу энергии генератора в линию при равенстве емкостей генератора и нагрузки. Такая схема импульсного заряда ФЛ наиболее

Таблица 3

№ п/п	Эквивалентная схема	U_1/U_2	n	T_n	$(di/dt)_{\text{ном}}$	Примечание
1		1	1	$\pi \sqrt{L C_n}$	U_1/L_1	При $K_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_n} = 0,5$
2		n	1	$\pi \sqrt{L_1 C_1}$	$U_1/0,64 L_1$	При $L_1 C_1 = L_2 C_n$ и $K = 0,6$ $n = \sqrt{L_2/L_1} = \sqrt{C_1/C_n}$
3		n	1	$\pi \sqrt{L_1 C_1}$	$U_1/0,64 L_1$	при $L_1 C_1 = (L_2 + 2M) C_n$ и $K_0 = 0,6$, где $K_0 = \frac{1,2 K \pi}{\pi}$; $n_0 = \sqrt{1 + 2K\pi + \pi^2} = \sqrt{\frac{C_1}{C_n}}$; $n = \sqrt{L_2/L_1}$; $K = \frac{M}{L_1 L_2}$
4		n	1	$\pi \sqrt{\frac{L_1 C_1}{n - 0,6}}$	$U_1/L_1(1-K)$	при $L_1 C_1 = L_2 C_0/C_1 + C_2$, где $C_2 = C_0 C_2 / (C_2 + C_1)$; $K = \frac{0,6 \pi - 1}{\pi - 0,6}$; $n = \sqrt{L_2/L_1} = \sqrt{\frac{C_1 + C_0}{C_n}}$
5		n	1	$2\pi \sqrt{L_1 C_1 (1 - K^2)}$	$a(n) U_1/L_1$	при $L_1 C_1 = L_2 C_2 / (C_2 + C_1) + C_3$ и $K_{12} = K_{23}$, $K_{12}^2 = K_{23}^2$, где $K_{12} = \frac{C_2}{C_2 + C_1}$; $K_{23} = \frac{C_3}{C_3 + C_2}$; $K_{12} = f(n)$ и $K_{23} = f(n)$

ностей и емкостей, получены результаты, хорошо совпадающие с расчетными параметрами схемы.

Следует заметить, что в схемах импульсного заряда ФЛ через линию передачи возможна трансформация напряжения при замене линии передачи на один из известных видов согласующихся трансформаторов с распределенными параметрами, а значит, возможна замена ГИИ на одну накопительную емкость с одним коммутатором. В этом случае приведенные параметры зарядной цепи остаются теми же, а зарядное напряжение ФЛ умножается на коэффициент трансформации. Однако реализация таких схем затруднена из-за больших размеров трансформатора с распределенными параметрами /время задержки трансформатора должно быть по крайней мере больше половины длительности импульса, формируемого при разряде накопительной емкости на входное сопротивление трансформатора/.

В табл.2 представлены результаты анализа многозвенных схем импульсного заряда ФЛ.

Известны схемы генераторов ^{1/4}, позволяющие получать на активной нагрузке прямоугольный импульс напряжения с амплитудой

$U_H = m U_3 / m$ - коэффициент трансформации, равный 1/2; 1; 3/2 и т.д., U_3 - зарядное напряжение генератора/. Такие схемы, в частности, получаются при перебрасывании отрезка ФЛ со входа передающей линии, состоящей из $(2m - 1)$ отрезков с одинаковым временем задержки, на ее конец. Заменяв отрезки линий на $L_k C_k$ - звенья / $k = 1, 2, 3$ и т.д. - порядковый номер звена/, а активную нагрузку - на L_H и C_H , получим эквивалентные схемы импульсного заряда ФЛ, приведенные в табл.2 под номерами 1, 3 и 5. При одинаковых временах задержки каждого звена и известной нагрузке нетрудно получить законы изменения индуктивностей и емкостей в звеньях, используя формулы для волновых сопротивлений из работы ^{1/4}:

$$L_k = \frac{k(k+1)}{n} L_0, \quad L_0 = \frac{L_H}{n};$$

$$C_k = \frac{n}{(k+1)k} C_0, \quad C_0 = n C_H;$$

где $n = \sqrt{\frac{C_0 + \sum C_k}{C_H}}$ - коэффициент трансформации схемы. Число

звеньев определяется числом замененных отрезков линий и равно коэффициенту трансформации схемы.

Анализ полученных таким образом многозвенных схем импульсного заряда ФЛ был проведен в численном виде для известных реальных значений емкости и индуктивности нагрузки. При анализе не учитывалось затухание в звеньях.

Из табл.2 видно, что многозвенные схемы /схемы 1, 3 и 5/ при одинаковых временах задержки каждого звена не обеспечивают полной передачи энергии, и потери энергии растут с увеличением числа звеньев. Так, при увеличении числа звеньев с двух /схема 1/ до четырех /схема 5/ к.п.д. зарядной цепи уменьшается с 92% до 83% при увеличении времени заряда ФЛ с 440 до 770 нс.

Рассматривая эти эквивалентные схемы при условии равенства частот контуров, а не времени задержки звеньев, можно найти, что к.п.д. зарядной цепи несколько увеличивается. Например, с 92% до 94% - для двухзвенной схемы /схема 1/ и с 86% до 88% - для трехзвенной /схема 3/. Одновременно увеличивается и время заряда линии. Видно, что и при таком условии полной передачи энергии не происходит.

Эквивалентные схемы 2, 4 и 6 имеют лишь одну накопительную емкость - C_1 . В таких цепях импульсного заряда ФЛ потери при передаче энергии и напряжения возрастают еще больше. Следует отметить, что время заряда ФЛ в этих схемах существенно уменьшается при исключении из схем первичной индуктивности ($L_1 \rightarrow \infty$).

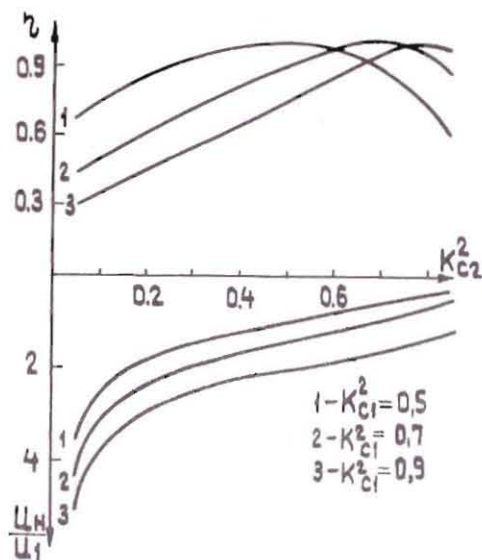


Рис.1. К.п.д. и зарядное напряжение ФЛ в зависимости от соотношения емкостей цепи импульсного заряда ФЛ.

В эквивалентной схеме 7 учтена электромагнитная связь между зарядными индуктивностями L_1 и L_2 . Ее анализ был проведен в общем виде. При определенных условиях, указанных в примечании, в такой цепи импульсного заряда ФЛ происходит полная передача энергии. Хотя время заряда ФЛ здесь больше, чем в цепи импульсного заряда ФЛ через индуктивность, наличие дополнительной емкости и коэффициента электромагнитной связи между индуктивностями может привести

к значительному выигрышу в напряжении заряда ФЛ при приемлемом к.п.д. зарядной цепи /рис.1/.

В табл.3 приведены эквивалентные схемы, обеспечивающие полную передачу энергии из первичной накопительной емкости или емкостей в емкость нагрузки. В эту таблицу добавлена графа $(di_1/dt)_{\max}$, обозначающая максимальную крутизну тока, протекающего через коммутатор.

Эквивалентная схема импульсного заряда ФЛ через зарядную индуктивность /схема 1/ была описана выше.

В схеме с импульсным трансформатором /схема 2/ и в схеме с импульсным автотрансформатором /схема 3/ полная передача энергии и трансформация напряжения происходит при равенстве частот контуров и определенном коэффициенте электромагнитной связи k , равном 0,6 /минимальное время заряда ФЛ из ряда значений k /.

Указанные три схемы обычно применяются на практике для импульсного заряда формирующих линий. Отметим, что в системах питания стримерных камер импульсный трансформатор или автотрансформатор /ИТ/ выгодно применять при высоком значении коэффициента связи $/k \geq 0,8/$, если будет разрешена проблема высоковольтной изоляции ^{5/}.

Двухконтурная схема 4 и трехконтурная схема 5 импульсного заряда ФЛ получены из описанных выше многозвенных схем путем учета коэффициентов электромагнитной связи между индуктивностями звеньев. При указанных в примечании условиях в этих схемах происходит полная передача энергии и трансформация напряжения заряда линии. Коэффициенты электромагнитной связи здесь зависят

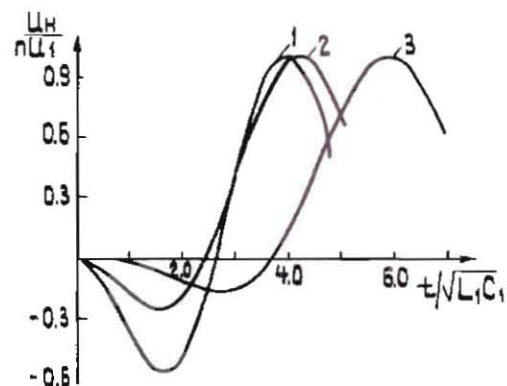


Рис.2. Типичные формы зарядного напряжения ФЛ в схеме импульсного трансформатора /1/, двухконтурной /2/ и трехконтурной /3/ схемах импульсного заряда ФЛ ($n = 5$).

от коэффициента трансформации n , и их значения меньше, чем в схеме ИТ, при реальных значениях n .

Типичные формы зарядного напряжения ФЛ в схеме ИТ /кривая 1/, двухконтурной /кривая 2/ и трехконтурной

/кривая 3/ схемах приведены на рис.2. Видно, что рабочей является вторая полуволна зарядного напряжения. В последних двух схемах максимальная амплитуда первой полуволны зарядного напряжения зависит от коэффициента трансформации, и ее значение меньше, чем в схеме ИТ. Подробный анализ работы двухконтурной и трехконтурной схем импульсного заряда ФЛ приведен в работах ^{6,7/}.

На основе приведенных в табл.3 выражений для максимальной крутизны тока, протекающего через коммутатор, можно сравнить времена заряда ФЛ до максимального напряжения в приведенных схемах. Известно, что максимальная крутизна нарастания этого тока ограничена из-за конечной скорости расширения искрового канала. Например, при одноэлектронной коммутации в сжатом газе она составляет $\sim 10^{13}$ А/с. Из этого ограничения нетрудно найти минимальное значение индуктивности в цепи коммутатора и для одинаковых значений емкости и напряжения нагрузки сравнить времена заряда ФЛ в приведенных схемах. При таком критерии сравнения наименьшее значение времени заряда ФЛ получается в схеме заряда ФЛ через индуктивность. В схеме импульсного трансформатора /автотрансформатора/ время заряда ФЛ в $\sqrt{5n}$ раз больше, чем в схеме 1. Время заряда ФЛ в двухконтурной и трехконтурной схемах сравним с временем заряда в схеме ИТ ^{7/}.

Таким образом, электрические схемы, приведенные в табл.3, позволяют согласовать тракт импульсного заряда ФЛ и тем самым полностью передать запасенную энергию в нагрузку. Как показывают результаты анализа, двухконтурная или трехконтурная схемы импульсного заряда ФЛ выгодно отличаются от известных меньшими значениями коэффициента электромагнитной связи, меньшей величиной предимпульса зарядного напряжения при небольших коэффициентах трансформации и сравнимыми временами заряда линии. Небольшой коэффициент трансформации потребуются, если заряжать накопительные емкости двухконтурной /трехконтурной/ схемы от ГИИ через

зарядную индуктивность. Тогда полную структурную схему импульсного заряда ФЛ можно представить в следующем виде: генератор Аркадьева-Маркса - зарядная индуктивность - двухконтурная /трехконтурная/ схема - формирующая линия. Следует заметить, что двухконтурную или трехконтурную схему нетрудно выполнить симметричной, а значит можно будет повысить напряжение питания четырехэлектродной стримерной камеры /8/.

Приведенные результаты анализа не охватывают все эквивалентные схемы импульсного заряда ФЛ. Рассматривались схемы, позволяющие полностью согласовать весь тракт формирования высоковольтного наносекундного импульса с небольшими изменениями в существующей конструкции высоковольтного генератора /1/.

В заключение авторы выражают благодарность Ж.Ж.Мусульманбекову за помощь в численном расчете многозвенных схем, Н.С.Глаголевой и Е.А.Дементьеву за участие в обсуждении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксиненко В.Д. и др. ОИЯИ, Б1-13-10674, Дубна, 1977.
2. Глаголева Н.С. и др. ОИЯИ, 13-7792, Дубна, 1974.
3. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. Атомиздат, М., 1978, с. 80.
4. Литвиненко О.Н. Формирующие-трансформирующие цепи. "Советское радио", М., 1974.
5. Аксиненко В.Д. и др. ОИЯИ, Б1-13-10406, Дубна, 1977.
6. Аксиненко В.Д. и др. ОИЯИ, 13-82-764, Дубна, 1982.
7. Аксиненко В.Д. и др. ОИЯИ, 13-82-775, Дубна, 1982.
8. Володин В.Д. и др. ОИЯИ, Р13-10380, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 января 1983 года.

Аксиненко В.Д. и др.

13-83-37

Результаты анализа схем импульсного заряда формирующих линий в системах питания стримерных камер

Приведены результаты анализа различных схем импульсного заряда формирующих линий. Рассмотренные схемы импульсного заряда и их основные параметры (коэффициент полезного действия, относительная амплитуда заряда линии, время заряда линии) представлены в таблицах. Показано, что из схем, обеспечивающих полную передачу энергии и трансформацию напряжения, определенные преимущества имеют двухконтурная и трехконтурная схемы импульсного заряда формирующих линий. Эти схемы, в отличие от известной схемы импульсного трансформатора без сердечника, имеют меньшие значения коэффициента электромагнитной связи и амплитуды первого максимума зарядного напряжения. Приведена структурная схема импульсного заряда формирующих линий малой электрической длины в следующем виде: генератор Аркадьева-Маркса - зарядная индуктивность - двухконтурная /трехконтурная/ схема - формирующая линия.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Aksinenko V.D. et al.

13-83-37

Results of Analysis of Circuits of Forming Lines Pulse Charge

Results of analysis of different circuits of pulse charge forming lines (PFL) are presented. These circuits and their main parameters (energy transfer coefficient, relative ratio amplitude of PFL charging voltage, PFL charging time) are tabulated. It is shown that among the circuits that provide for full transmission of initial stored energy on the load and maximum voltage transfer the two section and three section ones offer a number of advantages. In contrast to the known circuit of pulse transformer without core, these circuits have less values of coupling coefficient and of primary maximum of PFL charging voltage. The circuit block diagram of RFL charge are as follows: Arkadiev-Marx generator - charge inductance - two section (three section) circuit - pulse forming line.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.