

Расчет схем питания НУЭ с полупроводниковыми прерывателями тока

II.1. Начало расчета

Основными исходными данными для расчета схемы питания НУЭ по схеме тиратрон–импульсный трансформатор–ППТ являются требуемое ускоряющее напряжение и средняя мощность в пучке. Их значения выбираются исходя из требований конкретных РТ к облучаемым изделиям и необходимой производительности (см. главы 4 и 5).

Ускоряющее напряжение U_y определяет минимальную энергию в импульсе $W_{и}$, которая необходима для получения импульса с требуемым током. Связано это с тем, что у ППТ и вакуумного диода имеются существенные по величине паразитные емкости $C_{п}$, которые необходимо зарядить. При этом, если величина паразитной емкости изменяется не существенно и лежит в пределах 5-10 пФ, то при увеличении ускоряющего напряжения с 200 до 1000 кВ требуемая энергия для зарядки этой паразитной емкости $W_{п}$ возрастает с долей до единиц джоуля, что приводит к необходимости увеличения величины минимальной энергии в импульсе $W_{и}$ (табл. II.1). Заметим, что запасенная в паразитной емкости энергия $W_{п}$, не теряется, а передается пучку электронов и в некоторых случаях может обострять фронт импульса тока. Таким образом, имея величину U_y по данным табл. II.1 выбираем значение $W_{и}$, которое носит оценочный характер и может существенно корректироваться при необходимости. Важно отметить, что энергия, переданная в пучок электронов, зависит от многих дополнительных факторов, рассмотренных в главах 2 и 3, и составляет около 25% от $W_{и}$.

Исходя из требуемой средней мощности и найденного значения $W_{и}$ находится частота работы НУЭ. Требуемое ускоряющее напряжение и тип диодов определяют количество последовательно и параллельно включаемых в ППТ диодов. Кроме того, количество последних определяется коммутируемым током, т.е. зависит от $W_{и}$.

Выбор типа используемых диодов в ППТ определяет значения оптимальной длительности и плотности токов прямой и обратной накачки. Характерные значения параметров диодов в режиме наносекундного обрыва тока (из работы [II.1]) приведены в табл. II.2.

Схема питания НУЭ должна обеспечить требуемые для эффективной работы ППТ условия по соотношению амплитуд (I_0, I_1) и длительностей ($t_{пр}, t_{об}$) токов прямой и обратной накачки. Известны следующие ограничения [II.1]: закон сохранения заряда (выполняется нестрого) и соотношение амплитуд токов:

$$(0,85-0,9) * t_{пр} * I_0 = t_{об} * I_1 ; \text{ при } 1 < J^+ < 10 \text{ кА/см}^2, \quad (\text{П.1})$$

где J^+ - плотность тока прямой накачки;

$$I_1 / I_0 = 3-10. \quad (\text{П.2})$$

Таблица П.1. Учет влияния паразитной емкости на параметры импульса

U _y , кВ	C _п , пФ	W _п , Дж	W _и , Дж
200	6,3	0,125	1,5
500	9,5	1,18	15
1000	12,7	6,37	60

Таблица П.2. Параметры диодов для ППТ

Тип диода	Диапазон плотностей тока прямой накачки J ⁺ , кА/см ²	Диапазон плотностей тока обратной накачки J ⁺ , кА/см ²	Площадь структуры S _д , см ²	Диапазон времени прямой накачки t _{пр} , нс	Диапазон времени обратной накачки t _{об} , нс	Рабочее напряжение U _д , кВ
Диоды серии КЦ105	10-60	10-60	~0,02	100-200	50-100	15-30
Диоды серии СДЛ	1-10	1-10	~0,2	200-800	50-200	80-160
SOS диоды	0,4-2	2-10	0,25-4	300-600	40-150	60-250

Таблица П.3. Параметры импульсных тиратронов [П.2,П.3]

Тип	Напряжение анода, кВ	Ток анода, кА	Средний ток, А	Ресурс	Частота работы, Гц
ТГИ1-1000/25	25	1	1	≥500 ч	700
ТГИ1-2000/35	35	2	3	≥1000 ч	330
ТГИ1-2500/50	50	2,5	4	≥1000 ч	400
ТГИ1-5000/50	50	5	10	≥1000 ч	125
ТП2-10к/25	25	10	0,5	≥1*10 ⁶ Кл	2000
ТП2-10к/50	50	10	0,35	≥1*10 ⁶ Кл	2000
ТП-5к/100	100	5	0,5	≥1*10 ⁶ Кл	500
ТД-150к/25	25	150	0,5	≥5*10 ⁵ Кл	50
ТД-50к/25	45	50	0,25	≥5*10 ⁵ Кл	50

Дальнейшая методика расчета состоит в следующем:

- 1) расчет параметров контуров прямой и обратной накачки ППТ;
- 2) расчет параметров импульсного трансформатора;
- 3) определение конструктивных параметров элементов схемы.
- 4) корректировка расчета с учетом имеющихся номиналов используемой элементной базы.

П.2. Расчет параметров контуров прямой и обратной накачки ППТ

Исходя из требования о минимальной энергии в импульсе $W_{и}$ (табл. П.1), определяем энергию W_{C1} в конденсаторе обратной накачки $C1$ (рис.1.3) с учетом потерь на коммутацию:

$$W_{C1} = 1,2 * W_{и} , \quad (П.3)$$

Принимая коэффициент перенапряжения в диапазоне $K_{п} = 2-3$ ($K_{п} = U_{y} / U_{C1}$) при использовании диодов типа СДЛ и работе схемы на нагрузку с сопротивлением больше волнового сопротивления контура обратной накачки, емкость конденсатора C_{C1} определяем так:

$$C_{C1} = 2 * W_{C1} / U_{C1}^2 , \quad (П.4)$$

где U_{C1} - напряжение на конденсаторе $C1$.

Величину индуктивности контура обратной накачки (рис.П.1) рассчитываем из выражения

$$L_1 = (L_{н} + L_{к}) = 4 * t_{об}^2 / (\pi^2 * C_{C1}) , \quad (П.5)$$

где $L_{н}$ - индуктивность вторичной обмотки ИТ в состоянии насыщения, $L_{к}$ - индуктивность высоковольтной части контура.

Затем оцениваем амплитуду тока I_1 в контуре обратной накачки:

$$I_1 = U_{C1} / (L_1 / C_{C1})^{0,5} . \quad (П.6)$$

Величину энергии W_{C0} в конденсаторе прямой накачки $C0$ (см. рис. П.1), с учетом потерь энергии в сердечнике импульсного трансформатора при времени ввода энергии до 500 нс достигающих 25%, можно найти в виде

$$W_{C0} = (1,2-1,3) * W_{C1} . \quad (П.7)$$

Исходя из рабочего напряжения используемого тиратрона (табл. П.3 [П.2,П.3]), находим емкость конденсатора $C0$:

$$C_{C0} = 2 * W_{C0} / U_{C0}^2 ; \quad (П.8)$$

где U_{C0} - напряжение на конденсаторе $C0$ (рабочее напряжение на тиратроне).

Время прямой накачки ППТ (см. рис. 1.3) определяем из соотношения

$$t_{\text{пр}} = \pi * (\kappa^2 * L_K + L_s) * C_{C0} / 2)^{0,5} . \quad (\text{П.9})$$

При этом величину индуктивности низковольтной части контура прямой накачки (в основном это индуктивность рассеяния импульсного трансформатора) можно задать на уровне $L_s \sim 1$ мкГ. Полученное значение времени прямой накачки должно находиться в требуемом диапазоне (см. табл. П.2).

Заметим, что основным параметром, позволяющим вернуться, при необходимости, в границы диапазона времен прямой накачки является U_{C0} .

Затем оцениваем амплитуду тока I_0 в контуре прямой накачки:

$$I_0 = 0,95 * U_{C0} / (2 * L_s / C_{C0})^{0,5} . \quad (\text{П.10})$$

Исходя из величины допустимой плотности тока прямой накачки J (см. табл. П.2) находим количество параллельных цепей $N_{\text{пц}}$ из диодов в ППТ и количество диодов $N_{\text{пд}}$ в каждой цепи:

$$N_{\text{пд}} = U_y / U_d ; \quad N_{\text{пц}} = I_1 / (J * S_d) . \quad (\text{П.11})$$

Анализ схем прямой и обратной накачки ППТ (см. рис. П.1) позволяет найти ограничения для рассматриваемой схемы питания НУЭ на соответствие соотношениям (П.1), (П.2):

$$I_1 / I_0 = (2 * (L_K + L_s) / (L_H + L_s))^{0,5} ; \quad (\text{П.12})$$

$$t_{\text{об}} / t_{\text{пр}} = \kappa * (2 * (\kappa^2 * L_K + L_s) / (L_H + L_s))^{0,5} ; \quad (\text{П.13})$$

$$(t_{\text{пр}} * I_0) / (t_{\text{об}} * I_1) = 0,5 * \kappa , \quad (\text{П.14})$$

где $\kappa = U_{C1} / U_{C0}$ – коэффициент трансформации ИТ. Таким образом, закон сохранения заряда (П.1) будет точно соблюдаться (из П.14) при $\kappa \sim 2$, а соотношение амплитуд токов (П.2) при $-L_s / L_H > 1$ (при $L_K \ll L_s$).

Полученные соотношения позволяют оценить только возможные диапазоны соотношений элементов рассматриваемой схемы питания НУЭ с ППТ, так как работа прерывателя не требует точного соблюдения закона сохранения заряда и при выводе соотношений (П.12)-(П.14), как впрочем, и во всей методике расчета контуров, не учитывалось сопротивление ППТ в режиме прямой накачки. Влияние сопротивления ППТ существенно именно в режиме прямой накачки, поскольку величина импеданса контура существенно меньше, чем при обратной накачке.

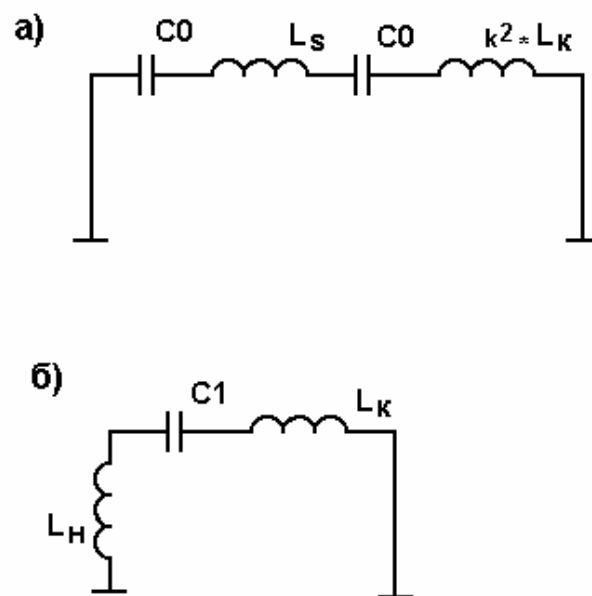


Рис. П.1 Схемы расчета ускорителя серии УРТ:

а) – для прямой накачки ППТ, б) – для обратной накачки ППТ:

C_0 и C_1 - конденсаторы прямой и обратной накачки, k – коэффициент трансформации ИТ,

L_k, L_n - индуктивности высоковольтной части контура обратной накачки и вторичной обмотки ИТ в состоянии насыщения, L_s – индуктивность рассеяния ИТ

П.3. Расчет параметров импульсного трансформатора

После выполнения расчета параметров контуров прямой и обратной накачки ППТ появляются все необходимые данные для расчета параметров импульсного трансформатора (ИТ). Методика полного расчета ИТ приведена в [П.4,П.5], поэтому рассмотрим только основные этапы расчета ИТ.

Основным соотношением, для расчета ИТ является

$$S_{\text{сер}} * n_2 = U_{C1} * t_{\text{пр}} / 2 * \Delta B, \quad (\text{П.15})$$

где $S_{\text{сер}}$ – площадь поперечного сечения сердечника ИТ; n_2 – число витков вторичной обмотки ИТ; $\Delta B \approx 2 B_s$ – максимальное приращение индукции; B_s – магнитная индукция насыщения материала сердечника.

Главное ограничение, возникающее при расчете ИТ, состоит в том, что величина индуктивности вторичной обмотки ИТ в состоянии насыщения L_n должна быть меньше индуктивности высоковольтной части контура обратной накачки L_k , поскольку в ее величину входят также конструкционные индуктивности диодов ППТ и конденсатора С1. Однако, величина конструкционных индуктивностей, как правило, существенно меньше L_n , значение которой оцениваем из формулы

$$L_n = \mu_0 * \mu_n * S_{\text{об}} * n_2^2 / l_s; \quad (\text{П.16})$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_n – магнитная проницаемость сердечника в положении замкнуто (определяется экспериментально, находится в диапазоне 1,5-2,5); $S_{\text{об}}$ – площадь поперечного сечения вторичной обмотки ИТ; l_s – длина средней силовой линии магнитного поля.

Основными параметрами, позволяющими вернуться в границы требуемого диапазона значений L_n являются $S_{\text{об}}$, n_2 и l_s .

Величина $S_{\text{об}}$ складывается из величины $S_{\text{сер}}$ и величины зазора на изоляцию между сердечником и вторичной обмоткой ИТ. Если сердечник ИТ не заземлен, то он находится под потенциалом равным $U_{C1}/2$ [П.4], и изоляцию необходимо рассчитывать на эту величину. При субмикросекундных временах воздействия и частотном режиме работы рабочая напряженность электрического поля в трансформаторном масле составляет (при двукратном запасе) около 50-70 кВ/см [П.4]. При расчете $S_{\text{об}}$ необходимо учитывать, что значение $S_{\text{сер}}$ относится к материалу сердечника. Реальный сердечник наматывается из ленты, и его объем необходимо увеличить на толщину слоя межслойной изоляции (20%) и учесть неплотность намотки (5%). Если сердечник состоит из нескольких дисков, то необходимо учитывать и зазор между дисками (обычно 3-5 мм) на теплоотвод.

Значение n_2 определяется из коэффициента трансформации ИТ (из выражения (1.6) и числа витков первичной обмотки n_1 , изменение которой незначительно ($n_1 = 1-3$). Для уменьшения индуктивности рассеяния ИТ первичную обмотку необходимо выполнять так, чтобы она пересекала не менее $1/3$ вторичной.

Значение l_s прежде всего определяется необходимостью обеспечить требуемую изоляцию между витками вторичной обмотки на внутренней поверхности ее каркаса. При субмикросекундных временах воздействия и частотном режиме работы рабочая напряженность электрического поля в трансформаторном масле по поверхности диэлектрика с близкой диэлектрической проницаемостью (оргстекло) и с учетом неоднородностей электрического поля, возникающих в промежутке, составляет, по нашим эмпирическим данным, около 5 кВ/см. Существенное увеличение l_s нежелательно, так как приводит к увеличению объема сердечника и, соответственно, потерь в нем.

Удельные потери в сердечнике W_C связаны с потерями на перемагничивание, которые определяются соотношением

$$W_C = \Delta B \cdot (2 \cdot H_c + 2 \cdot B_s \cdot \sigma^2 / (12 \cdot \rho \cdot t_{пр})), \quad (П.17)$$

где H_c - коэрцитивная сила, σ и ρ - толщина и удельное сопротивление материала сердечника (Таблица П.5).

Удельные потери в сердечнике уменьшаются при использовании для его изготовления более тонкой ленты и увеличиваются при уменьшении длительности импульса.

К моменту начала работ наиболее широкое применение находили сердечники из пермаллоя 50НП толщиной 10-20 мкм и шириной ленты 10-25 мм, из которых можно изготавливать сердечники с рабочими частотами до 1000 Гц и более. В настоящее время все более широкое применение находят сердечники из аморфных сплавов.

Таблица П.5. Параметры ферромагнитных материалов [П.4,П.6]

Марка стали	B_s , Тл	$\rho \cdot 10^{-6}$, Ом*м	σ , мм	H_c , А/м
50 НП	1,5	0,45	0,05	24
50 НП	1,5	0,45	0,02	36
50 НП	1,47	0,45	0,01	40
34НКМП	1,55	0,52	0,02	20
34НКМП	1,55	0,52	0,01	52
34НКМП	1,55	0,52	0,005	52

Таблица П.6. Параметры импульсных конденсаторов [П.7]

Исполнение	рабочее напряжение, кВ	емкость, пФ	Длина, см	диаметр, см	Объем, см ³	Запасаемая энергия, Дж	Плотность энергии, Дж/дм ³	Количество для накопления 100 Дж, шт.
КВИ-3в	12	3300	1,9	6,3	59,20	0,24	4,01/2,99*	421
	12	4700	2,2	7,5	97,14	0,34	3,48/2,71*	296
	12	6800	2,2	9	139,89	0,49	3,50/2,83*	204
	10	3300	1,8	5	35,33	0,17	4,67/3,24*	606
КВИ-3б	12	2200	1,8	5	35,33	0,16	4,48/3,11*	631
	16	1000	2	4	25,12	0,13	5,10/3,26*	781
	10	680	1,7	2,5	8,34	0,03	4,08/2,08*	2941
КВИ-3а	12	470	1,9	2,5	9,32	0,03	3,63/1,85*	2955
	16	470	2,1	2,5	10,30	0,06	5,84/2,98*	1662
	20	680	2,8	3,6	28,49	0,14	4,77/2,92*	735

* С учетом изоляции между секциями конденсаторов

П.4. Определение конструкционных параметров элементов схемы

Существенное влияние на параметры, конструкцию и эксплуатационные характеристики НУЭ с системой питания по схеме тиратрон – импульсный трансформатор – ППТ оказывают и другие элементы высоковольтных контуров, а именно тиратроны и высоковольтные конденсаторы.

Параметры выпускаемых промышленностью (НИИ ГП «Плазма», ООО "Импульсные технологии") импульсных тиратронов (см. табл. П.3) находятся в широком диапазоне значений. Определяющими при выборе тиратрона являются напряжение и ток анода, значения которых даны в табл. П.3.

Однако, кроме основных параметров, приведенных в табл. П.3, существенное значение при конструировании имеют дополнительные параметры, такие как величина тока накала (например, у тиратронов серии ТГИ1 находится в диапазоне от 25 до 80А, а у серии ТП2 составляет 2,5А), амплитуда импульса запуска, схема включения тиратрона, стоимость. Отметим, что по комплексу свойств в настоящее время лидерами являются тиратроны серии ТП2, несмотря на более сложную схему включения.

Конденсаторы С0 и С1 конструктивно выполняются из высоковольтных конденсаторов, выпускаемых промышленностью. Для получения требуемого значения рабочего напряжения они собираются последовательно в секции, которые для достижения требуемой емкости включаются параллельно. Исходя из требования простоты комплектации при изготовлении и ремонте системы питания НУЭ желательно использовать один тип и номинал конденсаторов.

К конденсаторам предъявляются достаточно жесткие требования по параметрам допустимых режимов: полный разряд за время $t_{пр}$ (100-800 нс), частота работы не менее 700 Гц и ресурс не менее 5 000 ч.

В настоящее время, из выпускаемых в России [П.8], для этой цели пригодны высоковольтные керамические конденсаторы типа КВИ-3 (табл. П.6). Несмотря на то что наибольшей плотностью запасаемой энергии обладают конденсаторы КВИ-3а-16кВ-470пФ их применение в системах питания НУЭ нецелесообразно. Как уже отмечалось выше, конденсаторы прямой и обратной накачки набираются из секций. Учет необходимости создания изоляционного промежутка между секциями конденсаторов (~5мм) приводит к существенному изменению картины (см. табл. П.6) - наибольшая плотность запасаемой энергии у конденсаторов КВИ-3б-16кВ-1000пФ. Но еще важнее тот факт, что диапазон удельной плотности снизился с 40 до 10-15%. Если же учесть требуемое количество конденсаторов для построения накопителя энергии на 100 Дж, то из-за трудоемкости соединения конденсаторов в секции, удобства обслуживания и замены секций при ремонте наиболее целесообразно использование конденсаторов КВИ-3в.

Из зарубежных конденсаторов хорошие характеристики имеют конденсаторы типа DHS японской фирмы «Murata»[П.9]. Для набора высоковольтной секций прекрасно подходят конденсаторы DHS4E4G202KTZB (40кВ, 2000пФ).

Результаты расчета систем питания ускорителей с ППТ по описанной методике приведены в табл. П.7.

Таблица П.7. Результаты расчета систем питания ускорителей с ППТ

Параметр	Группа ускорителя		
	1	2	3
Ускоряющее напряжение U_v , кВ	200	500	1 000
Мощность источника высокого напряжения, кВт	0,432	4,32	4,32
Минимальная энергия в импульсе $W_{и}$, Дж	1,5	15	60
Частота работы, Гц	200	200	50
Энергия в конденсаторе обратной накачки W_{C1} , Дж	1,8	18	72
Коэффициент перенапряжения $K_{п}$	2	2	2
U_{C1} - напряжение на конденсаторе $C1$, кВ	100	250	500
Емкость конденсатора $C1$, нФ	0,36	0,576	0,576
Время обратной накачки $t_{об}$, нс	60	70	80
Индуктивности контура обратной накачки L_1 , мкГн	4,06	3,45	4,5
Волновое сопротивление контура обратной накачки, Ом	106	77,4	88,5
Амплитуда тока в контуре обратной накачки I_1 , кА	0,94	3,3	5,65
Плотность тока в контуре обратной накачки J^- , кА/см ²	4,71	16,15	28,26
Энергии в конденсаторе прямой накачки W_{C0} , Дж	2,16	21,6	86,4
Рабочее напряжение тиратрона, кВ	25	25	50
Емкость конденсатора $C0$, нФ	6,91	69,1	69,1
Индуктивности контура прямой накачки L_K , мкГн	1,5	1,5	2
Время прямой накачки $t_{пр}$, нс	226	715	826
Волновое сопротивление контура прямой накачки, Ом	20,8	6,59	7,61
Амплитуда тока в контуре прямой накачки I_0 , А	190	360	624
Рабочее напряжение используемых диодов U_d , кВ	125	125	125
Количество диодов в цепи $N_{пд}$	2	4	8
Плотность тока в контуре прямой накачки J^+ , кА/см ²	0,95	1,8	3,12
Площадь диода S_d , см ²	0,2	0,2	0,2
Рабочая плотность обратного тока в ППТ, кА/см ²	5	5	5
Количество параллельных цепей $N_{пц}$	1	3	6
Заряд обратной накачки $t_{об} * I_1$, мкКл	56,5	226	452
Заряд прямой накачки $t_{пр} * I_0$, мкКл	43	258	515
Отношение амплитуд токов I_1/I_0	5	9	9
Коэффициент умножения ИТ	6	10	10

Список литературы к приложению

- П.1 46. Рукин С.Н. . Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока //ПТЭ. 1999. № 4. С.5-36.
- П.2 55. Кацнельсон Б.В., Калугин А.М., Ларионов А.С. Электровакуумные электронные и газоразрядные приборы: Справочник. М.: Радио и связь, 1985.
- П.3 84. Бочков В.Д., Королев Ю.Д., Франк К.Ф. и др. Псевдоискровые разрядники для схем питания импульсных лазеров// Изв. вузов. Физика. 2000. №5. С.97-105.
- П.4 60. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. Л.: Энергия, 1971, 148С.
- П.5 83. Мешков А.Н. Магнитные генераторы мощных наносекундных импульсов // ПТЭ. 1990. №1. С.23-37.
- П.6 88. Крупногабаритные ленточные магнитопроводы // НИИВН при ТПУ, Томск, 1986.
- П.7 94. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: справочник // под ред. Г.С. Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 656 С.
- П.8 <http://www.komi.com/Progress/product/capacitor/>
- П.9 <http://www.murata.com/>