

УДК 621.314

Копелович Е.А.¹, Ваняев В.В.², Хватов С.В.²**ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСКОРЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
В МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**Института прикладной физики РАН (Н. Новгород)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Приведено описание принципа действия высоковольтного импульсного источника питания, предназначенного для создания ускоряющего электрического поля в электрофизических установках на базе СВЧ приборов. Отличительной особенностью источника является уменьшенная энергоемкость входящих в него накопительных конденсаторов. Получены выражения для расчета параметров компонентов источника питания и приведены результаты его имитационного моделирования.

Ключевые слова: импульс, моделирование, энергоемкость, напряжение, тиристор.

Для решения ряда важных задач научного и прикладного значения, в частности, в области электротехнологий и физики ионных пучков используются электрофизические установки на базе различных типов мощных СВЧ-приборов (гиротронов, магнетронов и др.) [1, 2]. Принцип их действия основан на взаимодействии с электромагнитной волной пучка электронов, которые ускоряются в электрическом поле и фокусируются в магнитном поле. Характерным для мощных электрофизических установок данных приложений является импульсно-периодический режим генерации электромагнитного излучения со скважностью ≥ 10 .

Наиболее энергоемкими элементами систем электропитания мощных СВЧ-приборов являются генераторы высоковольтных импульсов напряжения (ГИН), с помощью которых формируется ускоряющее электрическое поле на интервале генерации электромагнитного излучения. Особо актуальным является создание ГИН с накопительными конденсаторами (НК), способных формировать на СВЧ-приборе прямоугольные импульсы напряжения амплитудой в десятки киловатт, длительностью в сотни микросекунд – единицы миллисекунд с неравномерностью вершины импульса напряжения менее 1%. При этом ток нагрузки составляет единицы – десятки ампер. В результате, при средней мощности ($10^3 \dots 10^5$) Вт мощность импульса в нагрузке равна (1...10) МВт. В связи с этим актуальными становятся вопросы повышения энергетических характеристик ГИН (энергоемкость, КПД).

Наиболее применяемый в настоящее время вариант построения ГИН основан на формировании прямоугольного импульса напряжения на нагрузке при частичном разряде НК через включенный последовательно с нагрузкой полностью управляемый (например транзисторный) коммутатор (рис. 1) [3].

В этом случае при формировании импульсов напряжения миллисекундного диапазона с малой неравномерностью вершины энергия, запасаемая в НК, во много раз превышает энергию, передаваемую в нагрузку на интервале импульса.

Для НК в схеме рис. 1 емкость C и запасаемая в ней энергия $W_{НК}$ определяются выражениями:

$$C \geq \frac{T_{и} U^{\max}}{R_{н} \Delta U}, \quad (1)$$

$$W_{НК} \approx W_{и} \frac{U^{\max}}{2\Delta U}, \quad (2)$$

где R_n - эквивалентное сопротивление нагрузки; T_n - длительность формируемого импульса; W_n - энергия импульса; U^{\max} - максимальное значение напряжения нагрузки; ΔU - снижение напряжения нагрузки на интервале T_n . Поэтому, например, при характерном для мощных СВЧ-приборов значении $\Delta U/U^{\max} \leq 0,01$, в соответствии с выражением (2), запасаемая в НК энергия более чем в 50 раз больше энергии импульса. Это требует использования в ГИН миллисекундного диапазона сложных, громоздких и дорогих емкостных накопителей энергии.

Для снижения энергоемкости НК в предлагаемый ГИН (рис. 2, а) между НК и транзисторным коммутатором VT введен многозвенный резистивный токоформирующий элемент (РТФЭ), содержащий N звеньев с тиристорами $VS1...VS_{N-1}$ и резисторами $R2...R_N$. РТФЭ позволяет путем уменьшения вводимого последовательно с нагрузкой добавочного сопротивления поддерживать величину напряжения на нагрузке неизменной в пределах заданной нестабильности [4].

Принцип работы такого ГИН при $N = 6$ поясняется диаграммами (рис. 2, б).

На интервале формирования выходного импульса напряжения в работе ГИН можно выделить N интервалов непрерывности, соответствующих включенному состоянию транзисторного коммутатора VT и тиристоров $VS1...VS_{N-1}$.

После зарядки НК от зарядного устройства (на рис. 2 не показано) до заданного начального уровня напряжения U_{01} система управления отпирает VT и далее поочередно с заданной временной задержкой включает тиристоры РТФЭ. При этом конденсатор C разряжается на нагрузку R_n через резисторы $R2...R_N$ звеньев, общее сопротивление которых по мере формирования импульса уменьшается. В результате напряжение нагрузки изменяется между максимальными и минимальными значениями (рис. 2, б).

На произвольном j -м интервале работы ГИН, когда открыты тиристоры 1-го, 2-го, 3-го, ... j -1-го звеньев РТФЭ, напряжение НК определяется из формулы

$$u_j \approx U_{0j} \left(1 - \frac{t}{R_j C} \right), \quad (3)$$

где U_{0j} , R_j - начальное напряжение НК и активное сопротивление силового контура на j -м интервале соответственно.

Максимальное значение напряжения нагрузки на j -м интервале

$$U_{nj}^{\max} = \frac{R_n}{R_j} U_{0j}. \quad (4)$$

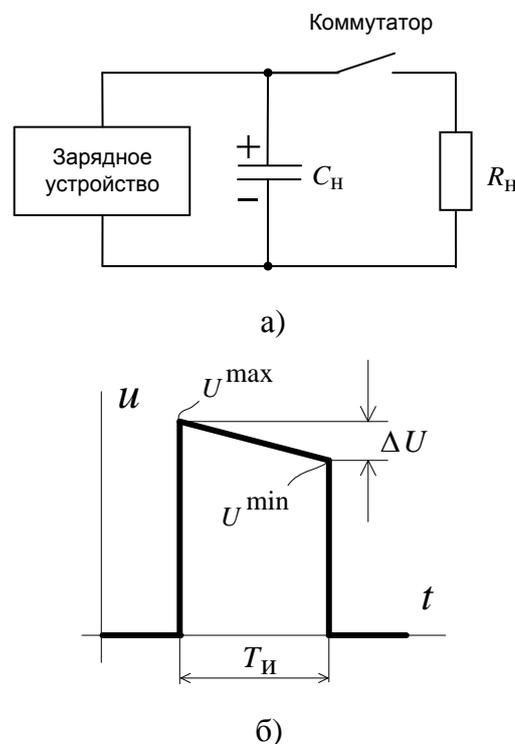


Рис. 1. Принцип построения ГИН с частичным разрядом НК:
а - схема ГИН,
б - выходное напряжение

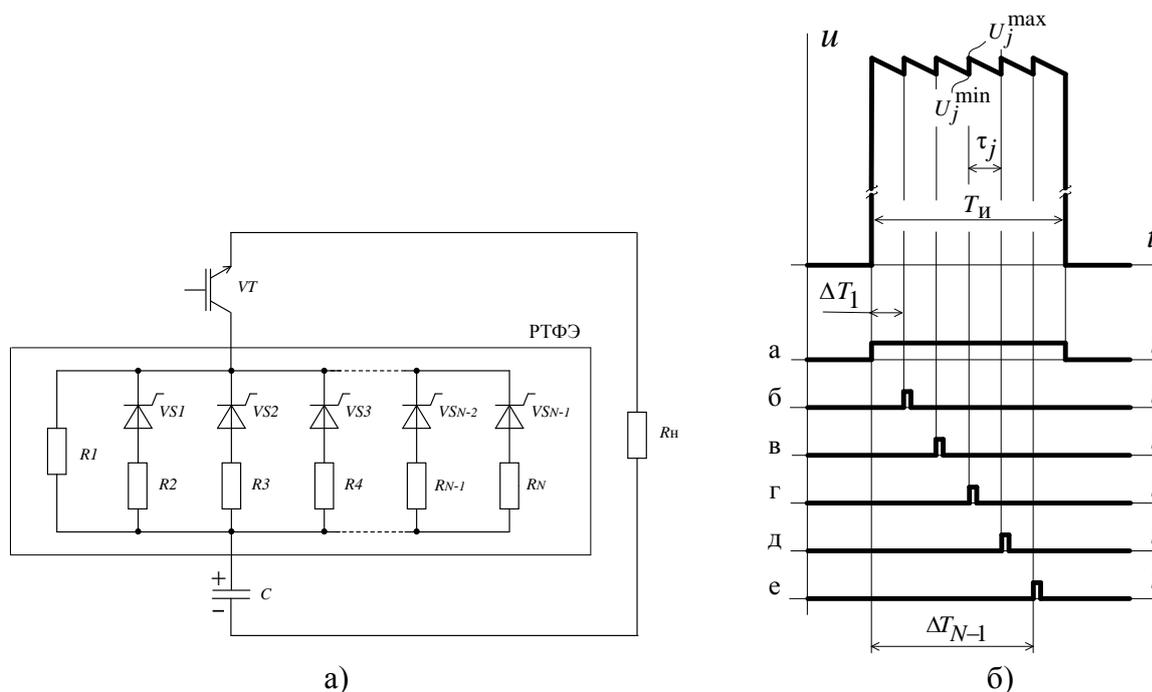


Рис. 2. Генератор импульсов напряжения с РТФЭ:

а – принципиальная схема; *б* – алгоритм работы;

u – напряжение на нагрузке; *а* – сигнал управления транзисторным коммутатором *VT*;

б, в, г, д, е – сигналы управления тиристорами *VS1...VS_{N-1}* соответственно

Минимальное значение напряжения нагрузки на этом интервале, в соответствии с выражениями (3) и (4), определяется выражением

$$U_{нj}^{\min} = U_{нj}^{\max} \left(1 - \frac{\tau_j}{R_j C} \right), \quad (5)$$

где τ_j - длительность *j*-го интервала.

Из выражения (3) с учетом (5) находим связь между значениями начальных напряжений НК на *j* и *j*+1-м интервалах работы РТФЭ:

$$U_{0j+1} \approx U_{0j} \left(1 - \frac{\tau_j}{R_j C} \right) = U_{0j} \left(\frac{U_{нj}^{\min}}{U_{нj}^{\max}} \right). \quad (6)$$

Из выражения (6) с учетом (4) находим соотношение между сопротивлениями силового контура на рассматриваемых интервалах

$$R_{j+1} = R_j \left(\frac{U_{нj}^{\min}}{U_{нj}^{\max}} \right). \quad (7)$$

Для получения наименьших пульсаций выходного напряжения ГИН необходимо, чтобы минимальные и максимальные напряжения на нагрузке на интервалах РТФЭ оставались неизменными, т.е.

$$U_{нj}^{\min} = U_{н}^{\min}, \quad U_{нj}^{\max} = U_{н}^{\max}. \quad (8)$$

При выполнении этих условий из выражения (7) следует система соотношений

Из выражений (13) и (14) определяем соотношение между емкостями НК сопоставляемых ГИН при формировании импульса с одинаковыми параметрами и при одном и том же сопротивлении нагрузки

$$C = \frac{1 - U_H^*}{(U_H^*)^{1-N} - U_H^*} C_1.$$

Энергоемкость НК генератора с РТФЭ при учете выражений (4) и (10) будет

$$W_C = \frac{CU_{01}^2}{2} = \frac{(U_H^*)^{2(1-N)}}{(U_H^*)^{1-N} - U_H^*} \frac{T_H(U_H)^2}{2R_H},$$

где $U_H = \frac{U_H^{\min} + U_H^{\max}}{2}$ - среднее значение напряжения нагрузки на интервале формируемого импульса.

Энергоемкость ГИН без РТФЭ с учетом (4) и (14) определяется по формуле

$$W_{C1} = \frac{C_1 U_0^2}{2} = \frac{1}{1 - U_H^*} \frac{T_H(U_H)^2}{2R_H}.$$

Из полученных выражений находим соотношение энергоемкостей НК сравниваемых устройств

$$W_C = \frac{(1 - U_H^*)(U_H^*)^{1-N}}{1 - (U_H^*)^N} W_{C1}.$$

На интервале формирования выходного импульса напряжение НК уменьшается. Относительное снижение напряжения НК в ГИН с РТФЭ рассчитывается по уравнению $\Delta U^* = 1 - U_H^*$, а в схеме без РТФЭ в соответствии с выражением (14): $\Delta U_1^* = 1 - U_{H1}^* = \frac{T_{H1}}{R_H C_1}$.

При одинаковых параметрах силовой цепи и длительности импульсов соотношение падений напряжения НК в рассматриваемых вариантах ГИН равно

$$\frac{\Delta U^*}{\Delta U_1^*} = \frac{1 - U_H^*}{(U_H^*)^{1-N} - U_H^*}.$$

При формировании импульса напряжения в нагрузке в РТФЭ выделяются потери энергии, величина которых при малых пульсациях тока и напряжения нагрузки равна

$$\Delta W = \int_0^{T_H} u \cdot i \cdot dt = \frac{U_H T_H}{R_H} U_2, \tag{15}$$

где u, i - мгновенные значения напряжения РТФЭ и тока нагрузки соответственно; U_2 - среднее значение падения напряжения на РТФЭ. Величина U_2 при указанных условиях определяется по уравнению

$$U_2 = \frac{\Delta U_C}{2} = \frac{U_H T_H}{2R_H C}, \tag{16}$$

где ΔU_C - приращение напряжения НК на интервале T_H .

Из выражений (15), (16) с учетом (13) находим относительное значение потерь энергии

$$\Delta W^* = \frac{\Delta W}{W_H} = \frac{T_H}{2R_H C} = \frac{(U_H^*)^{1-N} - U_H^*}{2}.$$

Коэффициент полезного действия ГИТ рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{1}{1 + \Delta W^*} = \frac{2}{2 + (U_H^*)^{1-N} - U_H^*}.$$

На рис. 3 приведены осциллограммы работы ГИН при отсутствии и наличии РТФЭ, полученные на имитационных моделях этих устройств в среде Matlab Simulink при следующих параметрах ГИН: $R_H = 1,25$ кОм; $U_{01} = 55$ кВ; $U_H = 50$ кВ; $T_H = 13$ мс; $\Delta U^* = 0,01$; $N = 10$. Моменты отпирания тиристоров РТФЭ рассчитаны в соответствии с выражением (12).

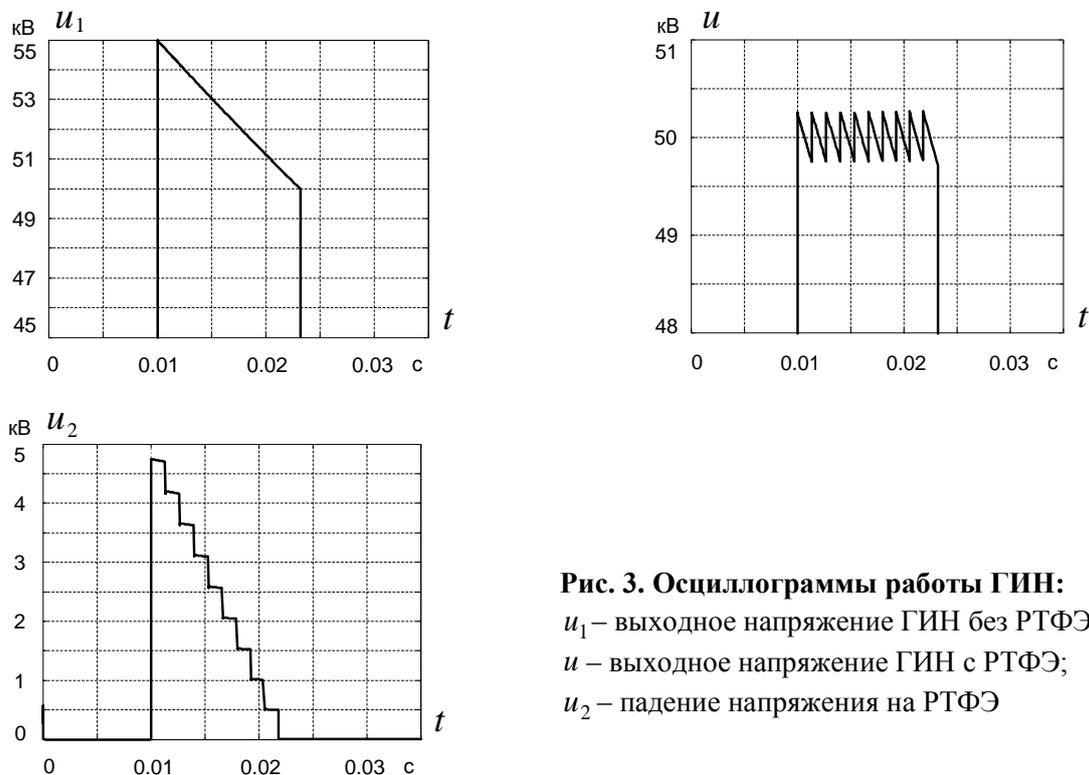


Рис. 3. Осциллограммы работы ГИН:
 u_1 – выходное напряжение ГИН без РТФЭ;
 u – выходное напряжение ГИН с РТФЭ;
 u_2 – падение напряжения на РТФЭ

Выводы

1. Применение ГИН с РТФЭ дает возможность значительно уменьшить емкость НК и величину накапливаемой в нем энергии. Так, при значениях $\Delta U^* = 0,01$ и $N = 10$ требуемое значение емкости ГИН равно $C \approx 0,095 C_1$ при формировании импульса с одинаковыми параметрами и одним и тем же сопротивлении нагрузки.

2. Уменьшение энергоемкости ГИН с РТФЭ позволяет уменьшить негативные последствия аварийных режимов, связанных с возможностью полного разряда НК на нагрузку при выходе из строя высоковольтного транзисторного ключа.

3. Введение РТФЭ в ГИН незначительно увеличивает потери в устройстве. Так, при указанных значениях параметров величина КПД генератора составляет 95%.

4. Полученные аналитические выражения, позволяющие рассчитывать величины сопротивлений шунтирующих резисторов и моменты отпирания тиристоров, служат основой разработки инженерной методики проектирования силовой части и системы управления ГИН с РТФЭ.

Библиографический список

1. **Копелович, Е.А.** Концепция построения высоковольтных источников питания для мощных электрофизических установок // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды НГТУ. - Н.Новгород, 2009. Т. 77. С. 32–36.

2. **Кириенко, В.П.** Преобразовательные устройства для систем электропитания импульсных нагрузок / В.П. Кириенко, Е.А. Копелович, В.Ф. Стрелков // Материалы Всемирного электротехнического конгресса, ВЭЛК-2005. – М., 2005.
3. Solid state modulator application in linear accelerators / M.P.J. Gaudreau [at al.] // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999. P. 1491–1493.
4. Патент на полезную модель № 90949 РФ, МПК Н 03 К 3/53. Генератор импульсных напряжений / Ваняев В.В., Копелович Е.А. Оpubл. 20.01.2010.

*Дата поступления
в редакцию 12.03.2010*

Е.А. Kopelovich, V.V. Vanyaev, S.V. Hvatov

**PULSE POWER SUPPLY
FOR CREATION THE ACCELERATING ELECTRIC FIELD
IN THE POWER ELECTRO PHYSICAL INSTALLATIONS**

This paper presents new high voltage power supply with pulse output voltage for creation the accelerating electric field in the electro physical installations based on the different high power vacuum electron devices. Distinctive feature of the power supply is reduced power intensity of the storage capacitors entering into it. Expressions for calculation of the power supply components parameters are developed and results of the power supply imitating modeling are reported.

Key words: pulse, modeling, power intensity, voltage, thyristor.