

## Оценка режима работы емкостного накопителя в высоковольтных генераторах наносекундных импульсов

*Выполнен анализ режима работы емкостного накопителя при раннем отключении полупроводникового прерывателя тока в высоковольтных генераторах наносекундных импульсов и предложены рекомендации по выбору оптимального момента отключения прерывателя.*

С обнаружением SOS-эффекта (наносекундного обрыва сверхплотных токов) появилась возможность разрабатывать генераторы наносекундных импульсов с улучшенными техническими характеристиками (по сравнению с генераторами с использованием магнитных ключей) и более продолжительным сроком службы (по сравнению с генераторами на плазменных приборах) [1]. SOS-эффект был открыт в 1992 г. в полупроводниковых диодах, и это позволило создавать генераторы импульсов наносекундного диапазона с использованием индуктивного накопителя и полупроводникового прерывателя тока [2]. Такой подход, как отмечено в [3], позволяет технически просто получать значения напряжений порядка сотен киловольт, а также относительно просто обеспечить требуемый уровень изоляции при формировании высоковольтных коротких импульсов. Кроме этого, в индуктивном накопителе обеспечивается более высокая плотность запасаемой энергии, чем в случае емкостного накопителя.

В качестве прерывателя тока индуктивного накопителя в генераторах стали применяться высоковольтные полупроводниковые диоды с SOS-эффектом (или SOS-диоды) [4]. Как известно, генераторы на основе SOS-диодов могут работать с высокой частотой следования импульсов, что обеспечивает достижение высокой удельной средней мощности. Таким образом, генераторы этого типа компактны, надежны и имеют длительный срок службы.

Несмотря на недавнее появление генераторов на основе SOS-диодов, они нашли широкое применение в разнообразных высокотехнологических приложениях: очистка и дезинфекция воды, накачка газовых лазеров, ионизация воздуха стримерным разрядом для удаления токсичных примесей, электросинтез озона и др. Генераторам на SOS-диодах посвящено множество публикаций, в которых публикуются экспериментальные данные, полученные при исследовании макетных образцов генераторов наносекундных импульсов, а также результаты испытания полупроводниковых прерывателей (например [1, 2, 4–6]).

Одним из основных факторов, который влияет на величину энергии, отдаваемой из выходного контура генератора в нагрузку, является момент отключения полупроводникового прерывателя. В работе [2] был экспериментально исследован генератор, в котором наблюдался режим раннего отключения тока прерывателем и было установлено, что такой режим повышает значение отдаваемой энергии в нагрузку. Цель уве-

личения энергии, отдаваемой в нагрузку, заставляет осуществлять выбор момента отключения прерывателя на этапе разработки генератора, так как не всегда только подстройкой параметров выходного контура генератора можно добиться оптимального результата. Однако, до настоящего времени процессы отдачи энергии в нагрузку для таких емкостных накопителей и пути повышения их эффективности работы изучены недостаточно. Поэтому в статье предлагается детальное рассмотрение процесса отдачи энергии в нагрузку и разработка рекомендаций по выбору оптимального момента отключения полупроводникового прерывателя тока, что является актуальным и востребованным практикой.

На первом этапе рассмотрим наносекундный обрыв сверхплотных токов полупроводниковым прерывателем. Экспериментальное исследование SOS-эффекта в работах в [5, 6] показало, что эффект резкого обрыва обратного тока наблюдался в высоковольтных выпрямительных диодах, предназначенных для выпрямления переменного тока, следующих типов: КЦ105Д, КЦ201Е, СДЛ 0,4–500 и др. При этом время обрыва обратного тока было существенно меньше времени жизни дырок в базе диодов.

На рис. 1. изображены зависимости тока через прерыватель и напряжения на нем от времени, которые демонстрируют эффект резкого обрыва тока (SOS-эффект). Из этого рисунка следует, что ток через прерыватель до момента обрыва изменяется во времени по синусоидальному закону.

Импульс прямого тока  $I_F$ , протекающего в течение времени  $t_F$ , обеспечивает заполнение электронно-дырочной плазмой базы диода и таким образом создает прямую накачку носителями прерывателя; импульс обратного тока  $I_R$ , протекающий в течение времени  $t_R$ , создает обратную накачку прерывателя. При обрыве тока на прерывателе появляется напряжение  $U_{VD}$ . Длительность импульса напряжения  $t_p$  (определяемая параметрами выходного контура и нагрузки генератора) соизмерима с длительностью обрыва тока прерывателем  $t_0$ .

Экспериментальные исследования из [2] показали, что в полупроводниковом диоде подбором плотности тока и времени накачки удается достичь режима нано-

секундного обрыва сверхплотных токов, т. е. в диоде в этом случае наблюдается SOS-эффект. При этом времени обрыва тока  $t_0$  может быть на порядок меньше длительности протекания обратного тока  $t_R$ . График, который демонстрирует область существования SOS-эффекта для диодов типа КЦ105Д, представлен на рис. 2 (на нем область SOS-эффекта выделена в виде прямоугольника). Из графика видно, что для диодов типа КЦ105Д (длина базы 100 мкм, площадь структуры  $0,02 \text{ см}^2$ ) резкий обрыв обратного тока, характеризующийся временем обрыва тока  $t_0 = 8-10 \text{ нс}$ , наблюдается в области значений времени прямой накачки  $t_F = 100-200 \text{ нс}$  и плотности прямого тока  $J_F = 10-60 \text{ кА/см}^2$ .

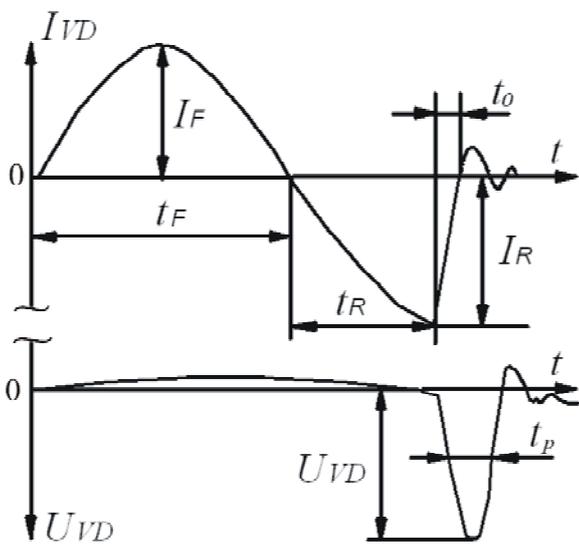


Рис. 1. Зависимость тока через прерыватель и напряжения на нем от времени

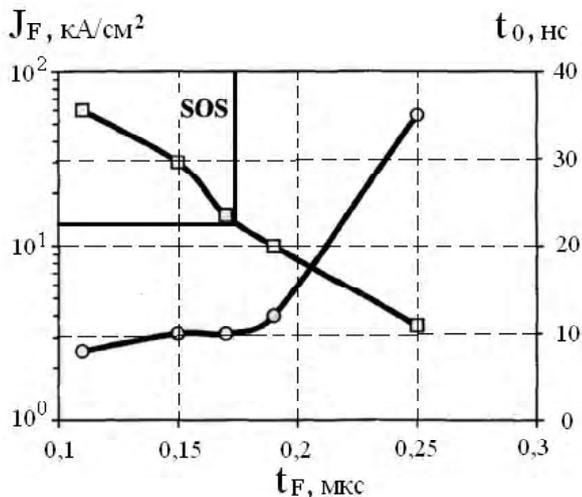


Рис. 2. Зависимость плотности тока прямой накачки  $J_F$  и времени обрыва тока  $t_0$  от длительности прямой накачки  $t_F$

Диод, работающий в области SOS-эффекта, по характеристике отключения является диодом с «жестким» режимом восстановления. Под коэффициентом жесткости понимается отношение длительности фазы высокой обратной проводимости к времени спада обратного тока. У диодов, работающих в режиме SOS-эффекта, коэффициент жесткости может достигать 10. При переключении в контуре с индуктивным накопителем в нагрузке перенапряжения могут составить 200–300 %.

Схема из работы [7], которая позволяет осуществить прямую и обратную накачку прерывателя, приведена на рис. 3. По существующей классификации она относится к двухконтурной схеме накачки. В данной расчетной эквивалентной схеме накачки прерывателя используется следующее допущение: нелинейные магнитные самонасыщающиеся ключи заменены идеальными ключами  $S_1, S_2$  и линейными индуктивностями  $L_1, L_2$  соответственно. Таким образом, при анализе не учитываются процессы перемагничивания сердечников магнитных ключей. Такое допущение справедливо при рассмотрении основных электромагнитных процессов в контурах схемы, так как время переключения магнитного ключа гораздо меньше длительности протекания тока через прерыватель.

Схема на рис. 3 состоит из двух контуров: прямой накачки прерывателя и обратной накачки. Конденсатор  $C_1$  предварительно заряжен до напряжения  $U_0$ . При замыкании ключа  $S_1$  конденсатор подключается к высоковольтному диоду  $VD$  через индуктивность  $L_1$ . Через диод  $VD$  протекает прямой ток, образуя контур прямой накачки. Прямая накачка диода заканчивается в момент перехода прямого тока через нулевой уровень. При последующем замыкании ключа  $S_2$  и размыкании  $S_1$  происходит включение в последовательную цепь с диодом  $VD$  и индуктивностью  $L_2$  конденсатора  $C_2$ . Через диод  $VD$  протекает обратный ток, образуя контур обратной накачки. Разделение контуров прямой и обратной накачки прерывателя позволяет регулировать длительность протекания обратного тока через прерыватель (независимо от контура прямой накачки).

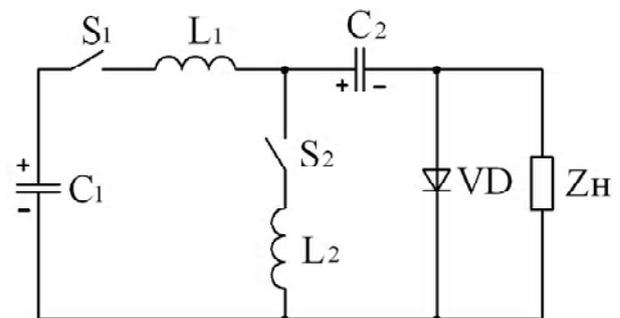


Рис. 3. Расчетная схема двухконтурной накачки полупроводникового прерывателя тока

При отключении тока прерывателем, когда ток через него достигает амплитудного значения (на рис. 4), накопительный конденсатор обратной накачки  $C_2$  (на рис. 3) подзаряжается (в течение длительности выходного импульса) до напряжения  $\Delta U_{C2}$ , которое показано на рис. 4. Таким образом, не вся начальная энергия накопителя поступает в нагрузку. Это наблюдается в том случае, когда длительность формируемого импульса лишь в несколько раз меньше длительности обратной накачки. При раннем отключении тока прерывателем (т. е., когда ток прерывателя не достиг амплитудного значения) практически всю энергию накопителя (без учета активных потерь) удастся на практике передать в нагрузку.

На рис. 4. пунктирной линией изображен обрыв тока в случае раннего отключения тока прерывателем. Этому случаю отключения тока прерывателем соответствует на рис. 4. значение угла  $\psi$  отключения тока, отсчитываемого (в направлении запаздывания) относительно точки начала процесса обратной накачки прерывателя. При этом значение угла  $\psi$ , исходя из условия раннего отключения тока, должно быть меньше, чем  $\pi/2$ , на некоторый угол  $\beta$ . Угол  $\beta$  (который отсчитывается влево от точки перехода напряжения на конденсаторе  $C_2$  через ноль) в дальнейшем будем называть углом опережения.

Угол опережения связан с углом отключения тока прерывателем следующим соотношением:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \beta. \quad (1)$$

Напряжение на емкостном накопителе  $C_2$  до обрыва тока изменяется по косинусоидальному закону:

$$u_{C2}(\vartheta) = U_{C02} \cos \vartheta, \quad (2)$$

где  $\vartheta = \omega_R t$  – относительное время,  $\omega_R$  – круговая частота контура обратной накачки.

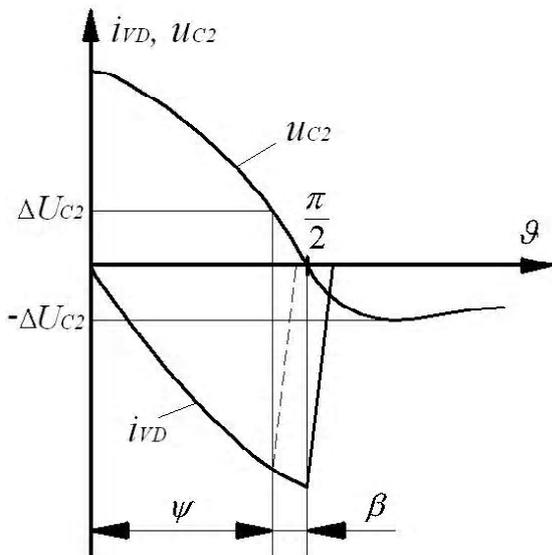


Рис. 4. Работа прерывателя VD с учетом угла опережения  $\beta$

Подставив в выражении (2) вместо  $u_{C2}(\vartheta)$  остаточное напряжение  $\Delta U_{C2}$  на конденсаторе  $C_2$  и решив тригонометрическое уравнение, запишем зависимость для угла отключения тока прерывателем в виде:

$$\psi = \arccos\left(\frac{\Delta U_{C2}}{U_{C02}}\right), \quad (3)$$

где  $\Delta U_{C2}$  – остаточное напряжение на емкостном накопителе  $C_2$ ;  $U_{C02}$  – начальное напряжение на емкостном накопителе.

Угол  $\psi$  отключения тока можно регулировать только путем изменения величины тока и времени накачки. Эти два параметра определяют время жизни электронно-дырочной плазмы в структуре прерывателя. Чем выше ток и время накачки, тем быстрее рекомбинирует плазма и раньше начинается обрыв тока (увеличивается угол  $\beta$ ).

Для определения эффективности использования энергии емкостного накопителя  $C_2$  в генераторах наносекундных импульсов при раннем отключении тока (по сравнению с режимом отключения тока при амплитудном значении) необходимо получить зависимость для начальной и остаточной энергии, а затем дать оценку относительной величины энергии, которая остается в емкостном накопителе  $C_2$  после формирования выходного импульса.

Начнем с получения соотношений для тока и напряжения на емкостном накопителе (конденсаторе обратной накачки). Так как в момент обрыва тока прерывателем в индуктивности  $L_2$  запасен некоторый ток  $I_0$ , то ток через конденсатор  $C_2$  рис. 3 будет описываться формулой:

$$i_C \approx \frac{I_0}{2}(1 + \cos \omega_H t), \quad (4)$$

где  $\omega_H$  – круговая частота контура нагрузки.

Соотношение для напряжения на конденсаторе  $C_2$  найдем, интегрируя выражение (4):

$$\begin{aligned} u_C(t) &\approx \frac{1}{C_2} \int i_C dt = \frac{1}{C_2} \int \frac{I_0}{2} (1 + \cos \omega_H t) dt = \\ &= \frac{1}{C_2} \cdot \frac{I_0}{2} t + \frac{1}{\omega_H C_2} \cdot \frac{I_0}{2} \sin \omega_H t. \end{aligned} \quad (5)$$

Энергия, запасенная в конденсаторе  $C_2$ , определяется соотношением:

$$W_{C2} = \frac{U_{C2}^2 \cdot C_2}{2}. \quad (6)$$

При расчете остаточной энергии на конденсаторе  $C_2$  необходимо использовать значение остаточного напря-

жения на емкости (в момент  $\omega_H t = \pi/2$ ), когда основная энергия контура обратной накачки будет выведена в нагрузку (и ток через конденсатор спадет до нуля). С учетом последнего получим из соотношения (5):

$$\Delta U_{C2} = \frac{I_0}{2C_2} \cdot t_u, \quad (7)$$

где  $t_u$  – длительность протекания тока через конденсатор  $C_2$ .

Длительность  $t_u$  протекания тока через накопитель  $C_2$  зависит от параметров полупроводникового прерывателя, контура обратной накачки и нагрузки. Поэтому получить точное выражение для длительности трудно. Отметим только то, что для большинства генераторов эта длительность составляет на практике (1–1,2) от значения длительности выходного импульса, измеренного на уровне половины амплитуды этого импульса.

Путем подстановки (7) в (6) определяется остаточная энергия конденсатора  $C_2$ :

$$W_{C2}^{ост} = \left( \frac{I_0}{2C_2} \cdot t_u \right)^2 \frac{C_2}{2} = \frac{I_0^2 \cdot t_u^2}{2C_2^2} \frac{C_2}{2} = \frac{I_0^2 \cdot t_u^2}{8C_2}. \quad (8)$$

Соотношение (8) учитывает остаточную энергию на конденсаторе  $C_2$ , которая накапливается в течение процесса обрыва обратного тока полупроводниковым прерывателем, так как входящее в это соотношение время  $t_u$  является функцией времени обрыва обратного тока  $t_0$ .

Так как ток  $I_0$ , накопленный в индуктивности  $L_2$ , зависит от значения начального напряжения на конденсаторе  $C_2$ , то найдем его следующим образом:

$$I_0 = U_{C02} \cdot \omega_R \cdot C_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = U_{C02} \cdot \omega_R \cdot C_2, \quad (9)$$

После подстановки (9) в (8) выражение для остаточной энергии на конденсаторе  $C_2$  имеет вид:

$$W_{C2}^{ост} = \frac{I_0^2 \cdot t_u^2}{8C_2} = \frac{(U_{C02} \cdot \omega_R \cdot t_u)^2 C_2}{8}. \quad (10)$$

Начальную энергию на конденсаторе  $C_2$  можно определить по формуле (6), подставив в нее начальное напряжение на данном конденсаторе:

$$W_{C2}^{нач} = \frac{U_{C02}^2 \cdot C_2}{2}. \quad (11)$$

Относительное значение энергии, которая не поступает в нагрузку при формировании выходного им-

пульса, можно найти как отношение остаточной энергии конденсатора  $C_2$  к начальной:

$$\lambda = \frac{W_{C2}^{ост}}{W_{C2}^{нач}} = \left( \frac{\omega_R \cdot t_u}{2} \right)^2. \quad (12)$$

Для генератора наносекундных импульсов, характеризуемого параметрами контура обратной накачки:  $C_2 = 800$  пФ,  $L_2 = 30$  мкГн ( $I_0 = 270$  А) и параметрами нагрузки:  $R_H = 1$  кОм,  $C_H = 20$  пФ, – произведение  $\omega_R \cdot t_u$  равно примерно 0,5. С учетом этого, относительное значение энергии, которую не удается отдать в нагрузку при отключении тока прерывателем (при амплитудном значении тока) составит:

$$\lambda = \left( \frac{0,5}{2} \right)^2 = 0,0625 \approx 0,063. \quad (13)$$

Остаточное напряжение на конденсаторе  $C_2$  компенсируется поступающей энергией от конденсатора  $C_1$  (при разряде конденсатора на конденсатор в процессе прямой накачки прерывателя тока в схеме рис. 3). Как отмечено в [8], для эффективной передачи энергии из конденсатора  $C_1$  в конденсатор  $C_2$  емкости обоих конденсаторов должны быть одинаковы. Кроме того, на это оказывают влияние активные потери в контуре передачи энергии и остаточное напряжение на конденсаторе. Выражение для коэффициента передачи энергии от конденсатора  $C_1$  к конденсатору  $C_2$  имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{\frac{C_1}{C_2} \left( 1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}} \right)^2}{\left( 1 + (C_1/C_2) \right)^2} \left( 1 - \frac{|\Delta U_{C2}|}{U_{C01}} \right)^2, \quad (14)$$

где  $U_{C02}$  – напряжение на конденсаторе  $C_2$  в конце процесса прямой накачки;  $\Delta U_{C2}$  – остаточное напряжение на конденсаторе  $C_2$ ;  $U_{C01}$  – напряжение на конденсаторе  $C_1$  в начале процесса прямой накачки;  $Q$  – добротность контура прямой накачки.

Из (14) следует, что, чем больше остаточное напряжение  $\Delta U_{C2}$ , тем меньше становится эффективность отдачи энергии из емкости  $C_1$ . Энергия, которая будет недополучена от конденсатора  $C_1$ , равна остаточной энергии конденсаторе  $C_2$  и в процентном эквиваленте для генератора с выше упомянутыми параметрами составит 6%. Теперь можно рассчитать полную энергию потерь в относительных единицах:

$$\lambda + (1 - \eta) = 0,063 + 0,063 = 0,126. \quad (15)$$

Таким образом, в случае работы емкостного накопителя  $C_2$  при раннем отключении прерывателя тока удастся повысить передачу энергии в нагрузку на 12 % от начальной энергии емкостного накопителя  $C_2$ .

Предложены рекомендации по выбору оптимального момента отключения прерывателя тока:

1. Исходя из длительности выходных импульсов генератора (заданной тех. заданием), следует оценить время обрыва обратного тока прерывателем  $t_0$ . При этом время  $t_0$  приблизительно в (3–4) раза меньше длительности выходного импульса, измеренного на полувывоте. По параметру  $t_0$  осуществляется предварительный выбор типа полупроводникового прерывателя (так как в дальнейших расчетах необходимо знать параметры прерывателя).

2. По графикам плотности тока прямой накачки  $J_F$  и времени обрыва тока  $t_0$  в зависимости от длительности прямой накачки  $t_F$  для выбранного прерывателя (пример которой приведен на рис. 2), исходя из площади полупроводниковой структуры прерывателя, определяются ток  $I_F$  и время прямой накачки.

3. Находится оптимальный момент времени отключения прерывателя, который задается согласно (3) величиной времени обратной накачки прерывателя для случая раннего отключения тока:

$$t_R = \frac{\Psi}{\omega_R} = \frac{1}{\omega_R} \arccos \left( \frac{\Delta U_{C2}}{U_{C02}} \right). \quad (16)$$

При этом значение остаточного напряжения  $\Delta U_{C2}$  на накопителе  $C_2$  определяется из соотношения (7).

4. Вычисляется коэффициент сжатия, под которым понимается отношение времени прямой накачки к времени обратной накачки (обычно коэффициент находится в пределах от 3 до 5) [2].

5. Определяется величина тока обратной накачки, исходя из величины тока прямой накачки  $I_F$  и значения коэффициента сжатия:

$$I_R = k_{сж} \cdot I_F. \quad (17)$$

При этом начальное значение тока в контуре обратной накачки  $I_0$  в момент начала отключения тока прерывателем должно быть равным амплитуде тока обратной накачки  $I_R$ .

## Выводы

1. Из проведенного анализа режима работы емкостного накопителя следует, что случай раннего отключения тока полупроводниковым прерывателем является более эффективным (по сравнению с отключением тока при амплитудном значении). При раннем отключении тока практически вся начальная энергия емкостного накопителя (без учета активных потерь) передается в нагрузку в течение длительности формирования выходного импульса.

2. Предложенные рекомендации по выбору момента отключения прерывателя оптимальны с точки зрения максимальной отдачи энергии, накопленной емкостным накопителем, в нагрузку.

## Перечень ссылок

1. Рукин С. Н. Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока. // Приборы и техника эксперимента, 1999. – № 4. – С. 5–36.
2. Любутин С. К., Рукин С. Н., Тимошенко С. П. Исследование полупроводникового размытителя тока в мощных импульсных генераторах с промежуточным индуктивным накопителем // IX Симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов 21 – 30 июля 1992. – Томск. – С. 218–219.
3. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 223 с.
4. SOS-диоды: наносекундные прерыватели сверхплотных токов. С. А. Дарзнец, С. К. Любутин, С. Н. Рукин и др. // Электротехника, 1999. – № 4. – С. 20–28.
5. Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов. Ю. А. Котов, Г. А. Месяц, С. Н. Рукин, А. Л. Филатов // Доклады международной академической издательской компании. – М.: Наука, 1993. – Т. 330. – № 3. – С. 315–317.
6. SOS-эффект: наносекундный обрыв сверхплотных токов в полупроводниках. С. А. Дарзнец, Ю. А. Котов, Г. А. Месяц, С. Н. Рукин // Доклады международной академической издательской компании. – М.: Наука, 1994. – Т. 334. – № 3. – С. 304–306.
7. Дарзнец С. А., Месяц Г. А., Рукин С. Н. Динамика электронно-дырочной плазмы в полупроводниковых прерывателях сверхплотных токов. // Журнал технической физики, 1997. – Т. 67. – Вып. 10. – С. 64–70.
8. Литвиненко Т. Н., Семенов В. В. Генератор высоковольтных субмикросекундных импульсов. // Техн. электродинамика. Тем. выпуск: Проблемы современной электротехники. Ч.4. – 2004. – С. 49–54.

Поступила в редакцию 23.10.06 г.

После доработки 15.02.07г.

*Виконано аналіз режиму роботи ємнісного накопичувача при ранньому відімкненні напівпровідникового переривача струму в високовольтних генераторах наносекундних імпульсів та запропоновані рекомендації що до вибору оптимальної миті відімкнення переривача.*

*The operation mode analyses of the capacitance accumulation for early switch-on of the semiconductor opening switch in the high-voltage nanosecond generator is performed and some guidelines for the optimal moment switch-off choice is proposed.*