

## ГЕНЕРАТОРЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ ДО 50000 ИМПУЛЬСОВ В СЕКУНДУ

© 2011 г. Н. И. Бойко, А. В. Борцов, Л. С. Евдошенко, В. М. Иванов

*Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт*

*“Молния” Национального технического университета*

*“Харьковский политехнический институт”*

*Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47*

Поступила в редакцию 26.10.2010 г.

После доработки 27.12.2010 г.

Описаны схемные и конструктивные особенности частотных (~50000 импульсов/с) генераторов импульсов высокого (до 10 кВ) напряжения микросекундного диапазона. Проанализирован (с целью уменьшения потребляемой энергии из сети) процесс передачи энергии из низковольтного разрядного контура (с IGBT-транзисторами в качестве коммутаторов) посредством повышающего импульсного трансформатора в нагрузку. Реализована схема генератора с обострением фронта импульсов в нагрузке (реакторе с импульсным коронным разрядом) с помощью многозазорного воздушного разрядника. Максимально достигнутая частота следования импульсов с обостренным фронтом составила ~27000 импульсов/с при напряжении ~3 кВ.

Генераторы высоковольтных импульсов находят широкое применение, как в научных исследованиях, так и в различных технологиях [1–6], а именно: в озонных технологиях; в технологиях очистки газовых выбросов (выхлопов двигателей внутреннего сгорания, выбросов теплоэлектростанций, промышленных производств и т.д.) и воды; в технологиях обеззараживающей обработки пищевых продуктов сильными импульсными электрическими полями и др.

В технологических применениях генераторов высоковольтных импульсов прослеживается тенденция повышения частоты следования импульсов до  $\geq 1000$  импульсов/с [4, 7, 8].

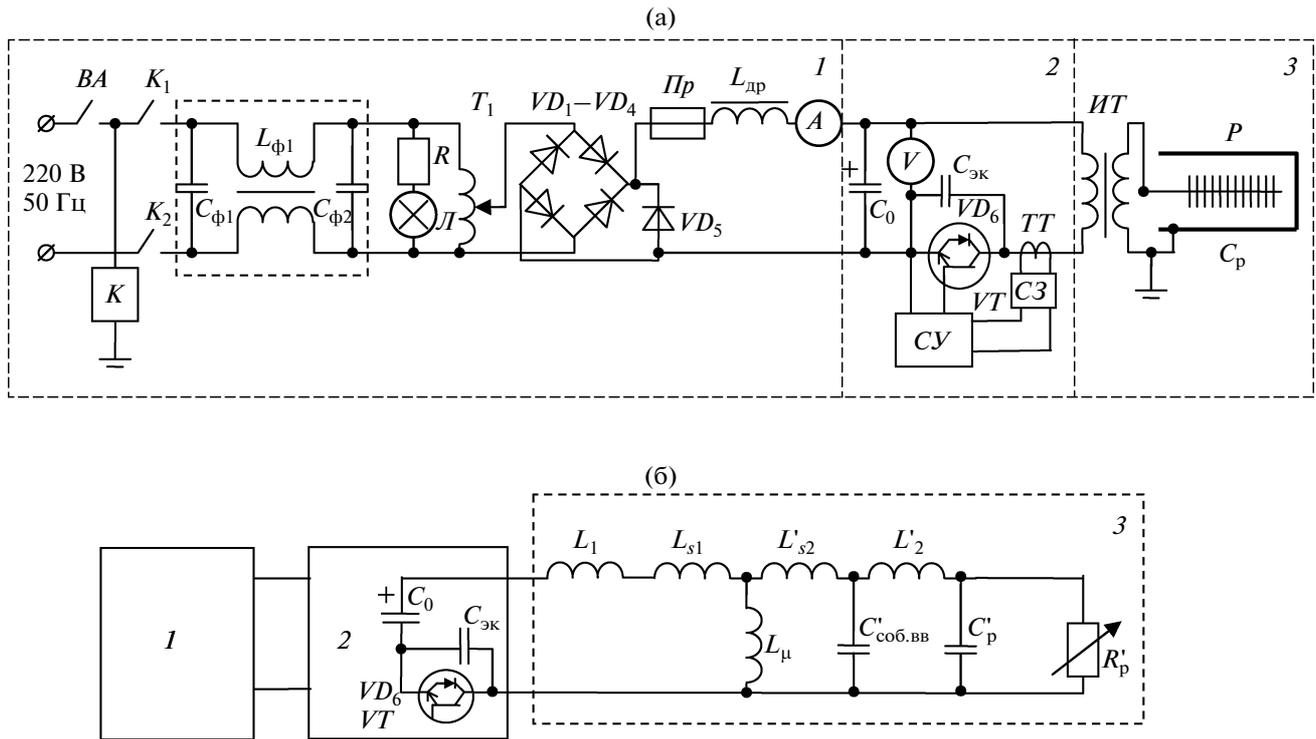
В работе рассмотрены особенности устройства и характеристики генераторов с импульсным повышающим трансформатором на ферритовом магнитопроводе, созданных в отделе электрофизических технологий НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ”. В генераторах используется коммутация биполярными транзисторами с изолированным затвором (IGBT) в цепи первичной обмотки импульсного трансформатора с плавно регулируемой частотой следования импульсов от 3000 до 50000 импульсов/с. Предусмотрена плавная регулировка амплитуды импульсов от 0 до 20 кВ. Первичный накопитель энергии в генераторах выполнен на компактных электролитических конденсаторах. Нагрузка генераторов может быть емкостной, резистивной, индуктивной, смешанной.

### СХЕМА ГЕНЕРАТОРА МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Упрощенная принципиальная электрическая схема генератора микросекундных импульсов с частотой следования импульсов до 50000 импульсов/с приведена на рис. 1.

Основной емкостный накопитель генератора  $C_0$ , выполненный на малогабаритных электролитических конденсаторах, заряжается от сети ~220 В, 50 Гц через выпрямительный диодный мост  $VD_1-VD_4$  и зарядный токоограничивающий дроссель  $L_{др}$ . Амплитуда зарядного напряжения  $C_0$  регулируется автотрансформатором  $T_1$  от 0 до 300 В.  $C_{\phi 1}L_{\phi 1}C_{\phi 2}$ -фильтр в цепи заряда защищает сеть от импульсных помех со стороны генератора (в случае пробоев, искровых разрядов в реакторе  $P$  с импульсным коронным разрядом (и.к.р.)), а также полупроводниковые приборы генератора от возможных импульсных помех из сети. Пускатель  $K$  обеспечивает подачу напряжения на вход зарядного устройства таким образом, что автоматический выключатель  $ВА$  всегда включен в цепь фазного провода – иначе контакты  $K_1$  и  $K_2$  пуска-теля не замкнутся.

Перед включением сетевой вилки генератора в розетку (разъем) питающей сети регулятор автотрансформатора  $T_1$  выставляется в положение, обеспечивающее нулевое выходное напряжение на нем. Затем включается питание генератора (при помощи выключателя  $ВА$ ) и система управления  $СУ$ , позволяющая регулировать частоту следования и длительность импульсов управления на транзисторах  $VT$ .



**Рис. 1.** Принципиальная (а) и блок-схема замещения (б) генератора микросекундных импульсов. 1 – зарядное устройство; 2 – генератор низковольтных исходных импульсов; 3 – генератор высоковольтных импульсов с нагрузкой  $P$ ;  $BA$  – выключатель автоматический ВА-2001-1ф/10А;  $K$  – пускатель 10 ПМЕ-111,  $K_1, K_2$  – контакты пускателя;  $C_{\phi 1}, C_{\phi 2}$  – емкости помехоподавляющего фильтра К73-17 100 нФ;  $L_{\phi 1}$  – бифилярно намотанные дроссели импульсного фильтра на ферритовом кольце  $120 \times 80 \times 8$  мм;  $L$  – индикаторная лампа (светодиод);  $R$  – добавочный токоограничивающий резистор МЛТ-0.125-100 кОм;  $T_1$  – автотрансформатор ЛАТР-1М 9А;  $VD_1-VD_4$  – выпрямительный диодный мост КВРС-5010;  $VD_5$  – защитный диод КД203Д;  $Pr$  – предохранитель на 5 А;  $L_{др}$  – зарядный дроссель (168 витков) на магнитопроводе ( $\varnothing_{внеш}$  80 мм,  $\varnothing_{внут}$  50 мм) из ленточной электротехнической стали (ширина ленты 40 мм, толщина 80 мкм);  $A$  – амперметр;  $V$  – вольтметр;  $C_0$  – 2350 мкФ (5 параллельно ТАМІСОН 470 мкФ 450 В);  $VT$  – IGBT IRG4PH50UD (8 параллельно) с обратным диодом  $VD_6$ ;  $C_{эк}$  – ~80 нФ, емкость между эмиттерами и коллекторами  $VT$ ;  $CY$  – система управления;  $CЗ$  – система защиты;  $TT$  – трансформатор тока;  $ИТ$  – импульсный трансформатор на ферритовом магнитопроводе,  $k_T = 100, w_1 = 3, w_2 = 300$ ;  $L_{\mu}$  – индуктивность намагничивания  $ИТ$ ;  $L_1$  – индуктивность подводящих проводов к первичной обмотке  $ИТ$  разрядного контура, содержащего  $C_0$  и  $VT$ ;  $L'_2 = L_2/k_T^2$  – приведенная к первичной обмотке  $ИТ$  индуктивность  $L_2$  подводящих к вторичной обмотке  $ИТ$  проводов высоковольтного разрядного контура, содержащего реактор  $P$ ;  $L_s = L_{s1} + L'_{s2}$  – индуктивность рассеяния  $ИТ$ , выполненная возможно меньшей при данном коэффициенте трансформации  $k_T$ ;  $L_{s1}, L'_{s2} = L_{s2}/k_T^2$  – минимально возможные индуктивности рассеяния первичной и приведенная вторичной обмоток соответственно;  $C'_p = k_T^2 C_p$  – приведенная к первичной обмотке суммарная емкость  $C_p$  реактора;  $C'_{соб.вв} = k_T^2 C_{соб.вв}$  – приведенная собственная паразитная емкость  $C_{соб.вв}$  высоковольтной вторичной обмотки;  $R'_p = R_p/k_T^2$  – приведенное нелинейное активное сопротивление коронного разряда  $R_p$  в реакторе.

После этого автотрансформатором  $T_1$  осуществляется подъем зарядного напряжения на  $C_0$  до требуемой амплитуды, измеряемой вольтметром  $V$ . При этом в нагрузку генератора – реактор  $P$  с частотой следования, установленной при помощи  $CY$ , через повышающий импульсный трансформатор  $ИТ$  подаются импульсы со все возрастающей амплитудой. При помощи автотрансформатора  $T_1$  напряжение на реакторе  $P$  можно

поднимать до уровня зажигания и.к.р. и далее, увеличивая интенсивность и.к.р. до предела, определяемого переходом и.к.р. в искровой разряд. На докоронных уровнях напряжения на  $P$  можно отрегулировать (в том числе минимизировать) потребляемую генератором мощность от сети, подбирая соответствующую частоту следования и длительность импульсов управления транзисторами  $VT$  при помощи  $CY$ .

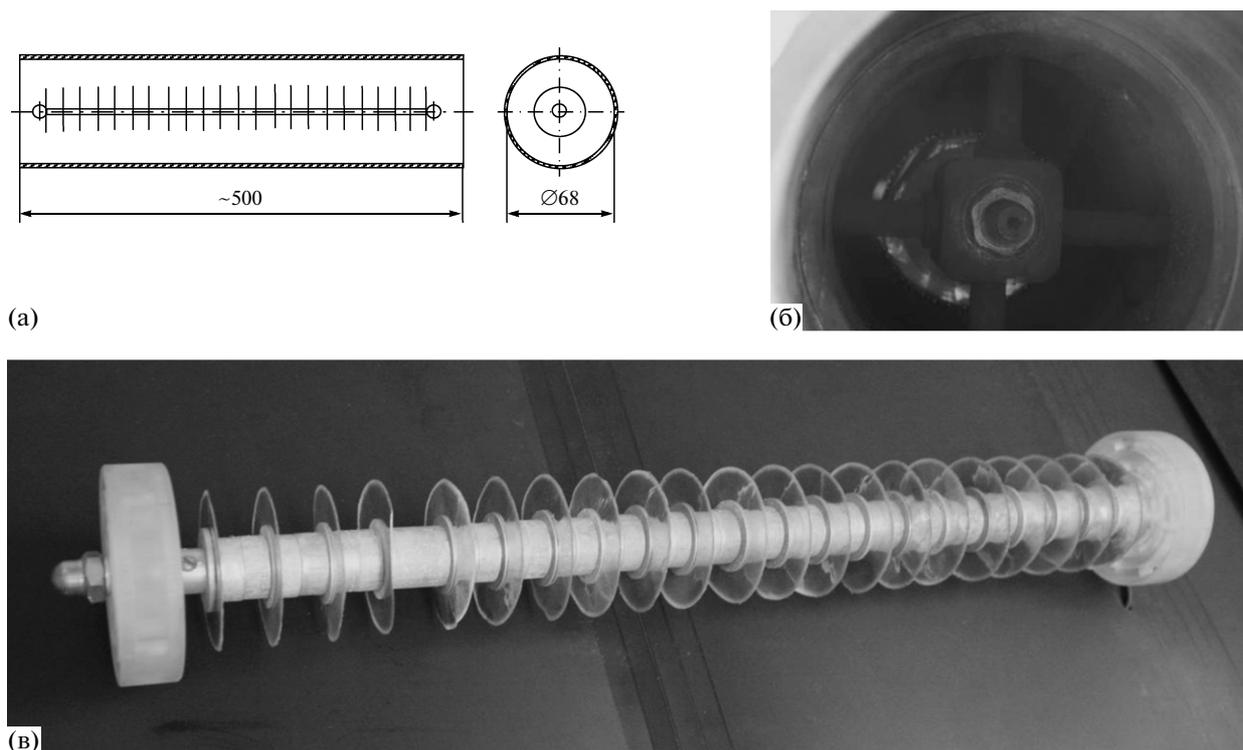


Рис. 2. Устройство реактора: а – эскиз реактора; б – импульсный коронный разряд в реакторе при частоте следования импульсов  $\approx 40\,000$  импульсов/с; в – внешний вид коронирующего электрода.

### УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАТОРА

Конструктивно генератор состоит из трех основных частей: 1 – зарядного устройства, 2 – генератора низковольтных исходных импульсов и 3 – собственно генератора высоковольтных импульсов с нагрузкой – реактором  $P$ . Низковольтные элементы 1 и 2 генератора смонтированы в одном металлическом экранированном корпусе. Особое внимание уделено минимизации индуктивности подводящих проводов в разрядном контуре в генераторе низковольтных импульсов при обеспечении технологичности устройства генератора в целом. Для этого одножильные многопроволочные подводящие провода длиной 70 см и сечением  $10\text{ мм}^2$  к выводам первичной обмотки ИТ подключены бифилярно (витая пара).

Трансформатор ИТ в генераторе 3 выполнен в корпусе  $180$  (длина)  $\times$   $110$  (ширина)  $\times$   $170$  мм (высота) из оргстекла и залит трансформаторным маслом. Количество витков в первичной обмотке  $w_1 = 3$ , во вторичной –  $w_2 = 300$ , коэффициент трансформации  $k_t = w_2/w_1 = 100$ . Магнитопровод выполнен броневым, разъемным, из восьми ферритовых (М 3000 НС) П-образных деталей сечением  $2\text{ см}^2$  каждая. Эти детали образуют четыре замкнутых прямоугольных магнитопровода с зазором  $0.1\text{--}0.15$  мм, заполненным твердым диэлектриком (например, кабельной бумагой).

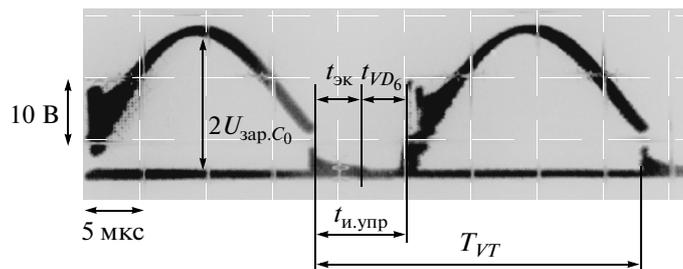
Размер внутреннего окна в магнитопровode  $39 \times 38$  мм.

Первичная обмотка выполнена шестислойной медной фольгой шириной 35 мм, толщиной 0.05 мм. Вторичная обмотка содержит 12 слоев и выполнена проводом ПЭТВ-0.25 (6 проводов параллельно общим сечением  $\sim 0.3\text{ мм}^2$ ). Твердой изоляцией между слоями служит фторопластовая пленка толщиной 20 мкм. К выводам вторичной обмотки ИТ подключена нагрузка – реактор  $P$  [9] для получения и.к.р. (рис. 2). Коронирующие диски выполнены из алюминиевой фольги толщиной 11 мкм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА

В экспериментах измерялись: напряжение на нагрузке (реакторе с емкостью 50–100 пФ) с помощью емкостного делителя напряжения; ток через реактор и общий коллекторный ток через IGBT с помощью шунта; напряжение на IGBT-коммутаторах при помощи прямой подачи напряжения между эмиттерами и коллекторами VT-ключа коаксиальным кабелем длиной  $\sim 3$  м на высокоомный вход (1 МОм, 30 пФ) осциллографа С8-12.

После подачи сигнала управления на транзисторы VT-ключа в цепи первичной обмотки ИТ



**Рис. 3.** Осциллограмма напряжения между коллектором и эмиттером транзистора  $VT$  в IGBT-ключе;  $T_{VT}$  — период — отрезок времени между двумя соседними моментами открытия транзисторов IGBT-ключа;  $t_{и.упр}$  — длительность импульсов управления, длительность открытого состояния транзистора;  $U_{зарC_0}$  — напряжение, до которого заряжается  $C_0$  (см. рис. 1);  $t_{экс}$  — отрезок времени, в течение которого ток через транзисторный ключ протекает в прямом направлении от коллекторов к эмиттерам;  $t_{VD_6}$  — отрезок времени, в течение которого ток через транзисторный ключ протекает в обратном направлении через обратные диоды (для обратных диодов это прямое направление).

энергия из первичного низковольтного емкостного накопителя  $C_0$  коммутируется в высоковольтную емкость  $C_p$  реактора при помощи ИТ (см. рис. 1). Этот процесс соответствует процессу в трансформаторе Тесла с одним существенным отличием — не преследуется цель передавать всю запасенную в  $C_0$  энергию в емкость  $C_p$  реактора. Ставится другая цель — передать из  $C_0$  энергию в  $C_p$  как можно быстрее, т.е. обеспечить минимальное время заряда  $t_{зарC_p}$  емкости  $C_p$  в контуре “ $C_0-L_1-L_{s1}-L'_{s2}-L_2-C'_p-C_0$ ” (см. рис. 1б). В описываемом генераторе  $C'_p \ll C_0$  и  $C_{соб.вв} \ll C_p$ , поэтому  $t_{зарC_p}$  можно приближенно определить из выражения

$$t_{зарC_p} = \pi k_T [(L_s + L_1 + L_2/k_T^2)(C_p + C_{соб.вв})]^{1/2}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что  $t_{зарC_p}$  примерно пропорционально коэффициенту трансформации при усло-

вии, что  $L_2/k_T^2 \ll L_1$  и что для получения минимального  $t_{зарC_p}$  параметры  $L_1, L_2, L_s, C_{соб.вв}$ , характеризующие ИТ, должны быть минимизированы. Для описываемого генератора при  $k_T = 100, L_1 = 2 \cdot 10^{-7}$  Гн,  $L_2 \approx 5 \cdot 10^{-7}$  Гн,  $L_s \approx 10^{-6}$  Гн,  $C_p = 10^{-10}$  Ф время заряда  $C_p$  составит  $t_{зарC_p} \approx 3.5 \cdot 10^{-6}$  с. В нашей оценке  $t_{зарC_p}$  мы пренебрегли  $C_{соб.вв}$  ( $C_{соб.вв} \approx 0$ ), однако следует отметить, что увеличение собственной емкости  $C_{соб.вв}$  высоковольтной обмотки ИТ замедляет процесс передачи энергии из  $C_0$  в  $C_p$  [10].

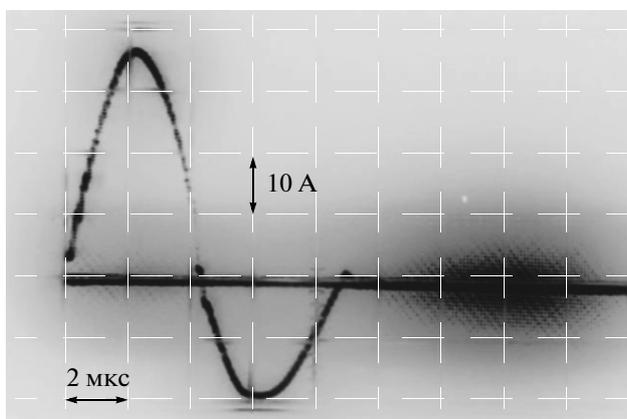
Работу транзисторного ключа  $VT$  иллюстрируют осциллограммы напряжения между эмиттерами и коллекторами его транзисторов и суммарного коллекторного тока, представленные на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

Поскольку  $C_{экс} \ll C_0$ , постольку на осциллограмме (рис. 3) при заряде  $C_{экс}$  (после закрытия  $VT$ ) через элементы цепи с ИТ (см. рис. 1) максимальное напряжение между эмиттерами и коллекторами IGBT по амплитуде превышает в  $\sim 2$  раза  $U_{зарC_p}$  (зарядное напряжение емкости  $C_0$ ). Время  $T_{C_{экс}}$  заряда  $C_{экс}$  определяется преимущественно величиной  $\pi(C'_p L_\mu)^{1/2}$  ( $C'_p > C_{экс}$ ) и для данного генератора в большинстве режимов составляло 8–9 мкс.

Рациональная длительность  $t_{и.упр}$  импульса управления транзисторами  $VT$  определяется как

$$t_{и.упр} \approx t_{экс} + t_{VD_6},$$

где  $t_{экс}$  — отрезок времени, когда суммарный коллекторный ток  $i_{VT}$  в первичном низковольтном контуре генератора протекает через открытые транзисторы  $VT$  IGBT-ключа;  $t_{VD_6}$  — следующий за  $t_{экс}$  отрезок времени, когда суммарный ток  $i_{VD_6}$  в этом контуре течет через открытые обратные диоды  $VD_6$  (в прямом для них направлении). Токи  $i_{VT}$  и  $i_{VD_6}$  протекают в противоположных направлениях (см. рис. 4).



**Рис. 4.** Осциллограмма суммарного коллекторного тока через транзисторный ключ, полученная при помощи резистивного шунта.

Момент окончания отрезка времени  $t_{эк}$  характеризуется на осциллограмме (рис. 3) небольшой “ступенькой”, соответствующей моменту смены направления протекания суммарного коллекторного тока (см. рис. 4) и начала его протекания через диоды  $VD_6$ .

На рис. 3 представлена осциллограмма, когда длительность импульсов управления близка к рациональной для параметров данного генератора. В этом случае импульс управления заканчивается в момент окончания протекания тока через обратные диоды  $VD_6$ .

В проведенных экспериментах, при длительности  $t_{и.упр}$  меньше рациональной, на осциллограммах напряжения между эмиттерами и коллекторами  $VT$  в моменты окончания  $t_{и.упр}$  наблюдались высокочастотные скачки напряжения. Амплитуда этих скачков может многократно превышать  $U_{зарC_0}$ . Как выяснилось в экспериментах, такие скачки (выбросы) напряжения между эмиттерами и коллекторами снижают ресурс транзисторов и даже могут привести к их пробое.

Увеличение длительности  $t_{и.упр}$  больше рациональной может привести к снижению максимальной частоты следования импульсов в реакторе. Кроме того, при отличии длительности  $t_{и.упр}$  от рациональной (как в большую, так и в меньшую стороны), увеличивалась потребляемая из сети энергия для одинакового напряжения на реакторе с и.к.р.

Наиболее часто в наших экспериментах использовался режим, в котором период повторения включения транзисторов равнялся  $T_{VT} \approx 25$  мкс,  $t_{и.упр} \approx t_{эк} + t_{VD_6} \approx 8$  мкс. При этом

$$T_{VT} - t_{эк} - t_{VD_6} \approx 25 - 8 = 17 \text{ мкс},$$

а амплитуда напряжения на транзисторах  $VT$  в моменты их включения  $U_{VT} \approx U_{зарC_0}$ .

Осциллограмма коллекторного тока на рис. 4 имеет форму одного периода затухающей синусоиды с полупериодом прямого тока  $i_{VT}$  через транзисторы (первая полувольтна —  $t_{эк}$ ) и полупериодом обратного тока  $i_{VD_6}$  (вторая полувольтна —  $t_{VD_6}$ ), который протекает через обратные диоды. После окончания одного периода тока через IGBT-ключ (первой и второй полувольтны тока) транзисторы закрыты, диоды в IGBT оказываются включенными в обратном (непроводящем) направлении. Следовательно, ток проводимости (активный ток) через IGBT между коллекторами и эмиттерами не течет до тех пор, пока система управления не обеспечит следующее включение IGBT-ключа, а емкостный (смещения) ток течет через емкость  $C_{эк}$ .

Из осциллограммы коллекторного тока на рис. 4 следует, что амплитуда обратного тока (тока второго полупериода) в  $\sim 2.5$  раза меньше, чем

прямого тока. Это означает, что энергия, возвращаемая обратным током в емкостный накопитель  $C_0$  и пропорциональная квадрату тока, в  $\sim 6$  раз меньше, чем энергия, переданная в нагрузку — реактор  $P$ . Следовательно,  $\approx 5/6$  энергии, извлеченной из  $C_0$  за каждый цикл включения и выключения транзисторного ключа  $VT$ , выделяется полезно в реакторе, а также выделяется в виде потерь в магнитопроводе  $ИТ$ , в проводах обмоток  $ИТ$ , в соединительных проводах, в транзисторах и обратных диодах ключа  $VT$ .

На рис. 5 приведены осциллограммы импульсов напряжения на реакторе  $P$  для двух различных частот следования импульсов управления транзисторами ключа  $VT$ . При этих частотах потребляемая генератором мощность из сети близка к минимальной. Как видно из осциллограмм на рис. 5, импульсы следуют в реактор один за другим без пауз и состоят из двух частей: быстрой и медленной. Быстрая часть определяется периодом колебаний  $T_6$ :

$$T_6 = 2\pi [(L_1 + L_{s1} + L'_{s2} + L'_2)(C'_p + C'_{соб.вв})]^{1/2}. \quad (2)$$

Соотношение (2) отличается от (1) тем, что индуктивности не обязательно минимальны и что учтен как процесс заряда  $C_p$  по контуру “ $C_0-L_1-L_{s1}-L'_{s2}-L'_2-(C'_p + C'_{соб.вв})$  — включенный (замкнутый) транзисторный ключ  $VT-C_0$ ”, так и процесс разряда  $C_p$  по контуру “ $(C'_p + C'_{соб.вв})-L'_2-L'_{s2}-L_{s1}-L_1-C_0$ —обратные диоды  $VD_6$  транзисторного ключа  $VT$ , находящиеся в проводящем состоянии,—  $(C'_p + C'_{соб.вв})$ ”.

Длительность  $t_{и.упр}$  импульса управления предпочтительно выбирать в диапазоне  $T_6/2 \leq t_{и.упр} \leq T_6$ . При этом желательно, чтобы  $t_{и.упр} \approx T_6$ . В этом случае ( $t_{и.упр} \approx T_6$ ) вся неизрасходованная энергия в  $C_p$  с  $R_p$  за один период  $T_6$  возвращается в  $C_0$ , а транзисторы  $VT$  к этому моменту закрываются, препятствуя нежелательной дополнительной передаче энергии в реактор, что обуславливает минимизацию потребления энергии из сети.

Медленная часть импульса на осциллограммах (рис. 5), следующая за первым наиболее коротким и наибольшим по амплитуде пиком отрицательной полярности, обусловлена колебаниями с периодом  $T_m$  с использованием энергии, запасенной в индуктивности намагничивания  $L_{\mu 2}$  вторичной обмотки  $ИТ$  (она существенно больше других индуктивностей  $ИТ$ ). Период  $T_m$  определяется индуктивностью  $L_{\mu 2}$  и емкостью реактора плюс собственная емкость высоковольтной обмотки  $ИТ$  ( $C_p + C_{соб.вв}$ ):

$$T_m = 2\pi [L_{\mu 2}(C_p + C_{соб.вв})]^{1/2}. \quad (3)$$

Паузы  $T_{п}$  между включениями транзисторного ключа  $VT$  следует подбирать такими, чтобы вы-

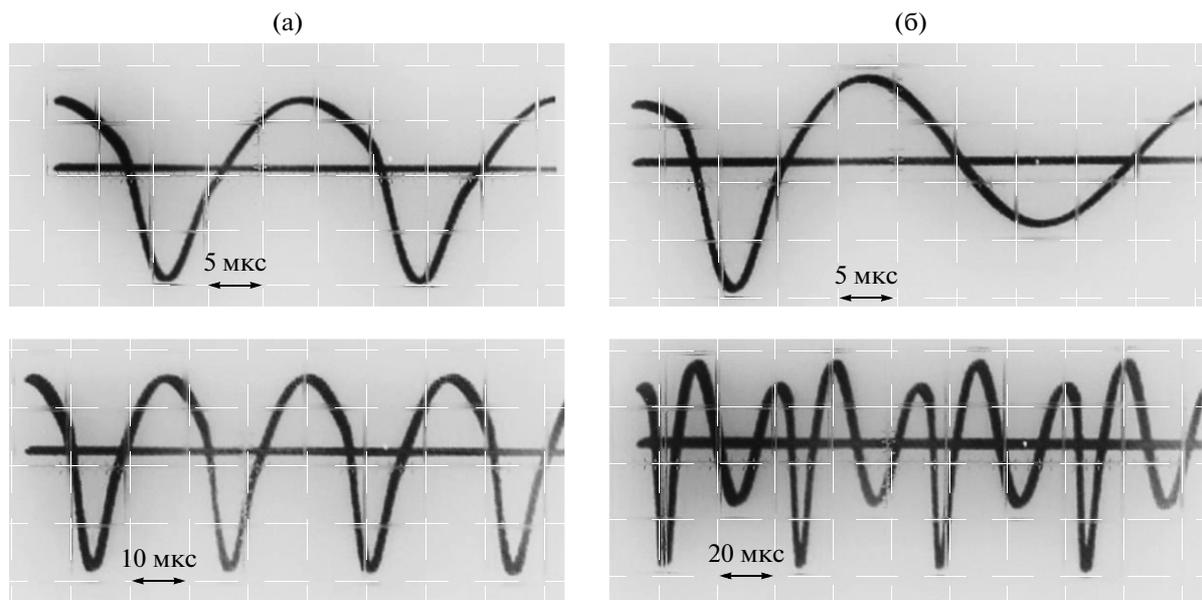


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения на реакторе  $P$  (5.25 кВ/деление): а –  $f_{сл} \approx 42\,500$  импульсов/с; б –  $f_{сл} \approx 20\,000$  импульсов/с.

полнялось соотношение  $T_{п} \approx (2m + 1)T_{м}/2$ , где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Тогда потребление энергии (мощности  $N_{мин}$ ) из сети будет близко к минимальному при сохранении эффективности коронного разряда в реакторе. Эксперименты показали, что максимальное потребление энергии (мощности  $N_{макс}$ ) из сети имеет место при включении ключа  $VT$  в моменты времени, когда напряжение заряда емкости  $C_{эк}$  имеет максимальное значение. В этом случае при  $m = 0$  получаем  $N_{макс}/N_{мин} \approx 3.5$ .

Указанные выше минимумы  $N_{мин}$  объясняются тем, что по окончании нечетных полупериодов  $T_{м}/2$  медленных колебаний после стартового быстрого полупериода  $T_{б}/2$  отрицательной полярности, имеющего место после включений ключа  $VT$ , происходит наилучшее (наиболее полное) перемagnичивание магнитопровода  $ИТ$ . В этом случае в момент очередного включения  $VT$  напряжение на реакторе  $P$  близко к нулю, а ток (обусловленный запасенной в высоковольтном контуре “ $L_{\mu 2} - (C_p + C_{соб.вв}) - L_{\mu 2}$ ” энергией) в прямом направлении (соответствующем открытому ключу  $VT$  в низковольтном контуре  $ИТ$ ) в этом контуре близок к максимальному.

Осциллограммы одного цикла тока и напряжения в реакторе приведены на рис. 6. Из рис. 4 и рис. 6а следует, что суммарный коллекторный ток в IGBT-ключе и ток в реакторе имеют подобную форму. Кроме того, осциллограммы импульсов напряжения и тока (см. рис. 6) позволяют заключить, что, в основном, активная мощность выделяется именно в и.к.р. в реакторе, приводя к нагреву последнего.

Выявленное влияние и.к.р. на импульсы в реакторе характеризуется следующим образом. Для сравнения на рис. 6б наложены две осциллограммы напряжения на реакторе: при горящем и.к.р. (1) и без него (2) при одинаковой длительности развертки (2 мкс/деление) и с разными чувствительностями по оси сигналов. Видно, что время нарастания напряжения до максимума первой (отрицательной) полуволны несколько меньше при наличии и.к.р., чем без него. Это уменьшение, вероятно, можно объяснить уменьшением постоянной времени  $R_p C_p$  для емкости реактора  $C_p$ , поскольку при горении и.к.р. уменьшается активное сопротивление реактора  $R_p$ . Аналогичное уменьшение длительности первой полуволны наблюдается и для токового сигнала.

Эксперименты показали, что в резконеоднородном поле реактора (многодисковый коронирующий составной электрод, дисковые острия которого выполнены из алюминиевой фольги толщиной 11 мкм, а несущий стержень – из стали, и соосный с ним внешний трубчатый электрод) при межэлектродных промежутках  $d \leq 0.5$  см коронный разряд отсутствует как при положительной, так и при отрицательной полярности. После определенного порогового напряжения в несколько киловольт развивается сразу искровой разряд. Для  $0.5 \leq d \leq 1.0$  см имеет место и.к.р. при отрицательной полярности коронирующего (высоковольтного) электрода.

Осциллограммы на рис. 5 иллюстрируют напряжение на реакторе при и.к.р. с отрицательной полярностью высоковольтного (коронирующего) электрода. Здесь и.к.р., по-видимому, горит толь-

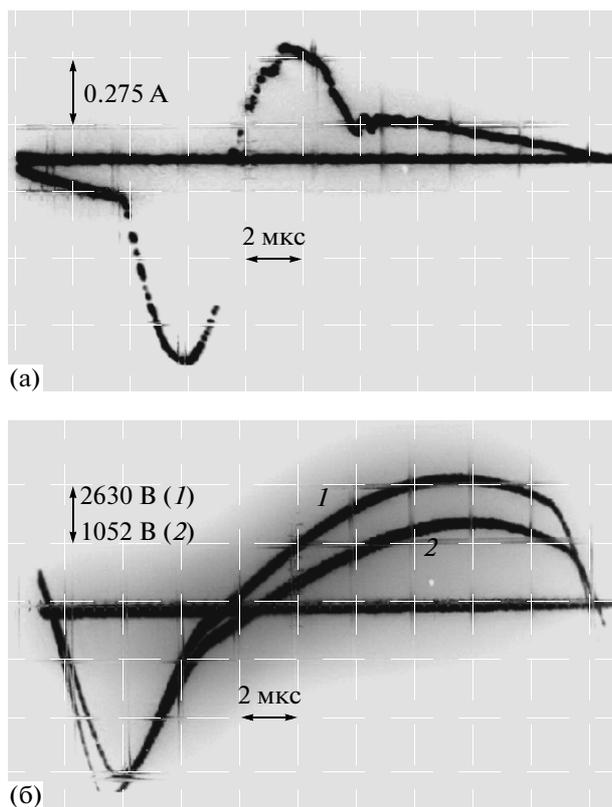


Рис. 6. Осциллограммы одного цикла тока и напряжения на реакторе: а – ток в реакторе с и.к.р.; б – напряжение на реакторе с и.к.р. (1) и без него (2).

ко в течение части полупериода  $T_6/2$ , когда напряжение на реакторе превышает пороговое напряжение зажигания и.к.р.

Система защиты СЗ генератора построена на основе измерительного трансформатора тока  $ИТ$ , первичная силовая обмотка которого представляет собой короткий токопроводящий стержень в основном низковольтном разрядном контуре генератора между одним из выводов первичной обмотки  $ИТ$  и коллекторами транзисторов  $ИТ$ . Принцип действия защиты состоит в том, что при

превышении установленного (заданного) порогового тока основного низковольтного разрядного контура генератора система защиты СЗ отключает управляющие сигналы от СУ, и транзисторы  $ИТ$  закрываются. После спада тока основного контура ниже порогового значения подача управляющих сигналов от СУ возобновляется.

### СХЕМА ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ С НАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ

Схема генератора импульсов с наносекундным фронтом приведена на рис. 7.

В качестве коммутатора, обеспечивающего получение на реакторе высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом, использовался многозазорный искровой разрядник  $МЗР$ . Преимущества этого наносекундного коммутатора: возможность получения импульсов с амплитудой несколько киловольт при атмосферном давлении, простота конструкции, отсутствие дефицитных материалов и элементов. Недостатки: недостаточная стабильность импульсов на нагрузке (реакторе), невысокая допустимая частота  $f_{сл}$  следования импульсов (удалось достигнуть  $f_{сл} \approx 27000$  импульсов/с при напряжении на реакторе  $\sim 3-5$  кВ).

При использовании схемы рис. 7 учитывалось то обстоятельство, что чем дольше после каждого импульса отсутствует напряжение на  $МЗР$  (т.е. чем больше пауза), тем лучше (надежнее, до большего значения пробивного напряжения  $U_{пр}$ ) восстанавливается электрическая прочность межэлектродных промежутков  $МЗР$ .

### ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ С НАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ

Этими особенностями являются наличие в высоковольтной цепи генератора нагрузочной емкости  $C_H$  (набрана из конденсаторов КВИ-2), нагрузочной индуктивности  $L_H$ , высоковольтного наносекундного коммутатора в виде многозазорного разрядника  $МЗР$ .

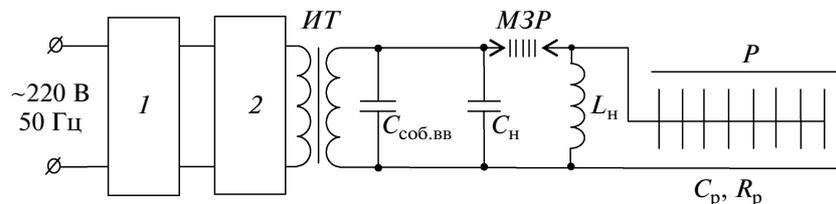


Рис. 7. Схема генератора импульсов с наносекундным фронтом. 1 – зарядное устройство; 2 – генератор низковольтных исходных импульсов;  $ИТ$  – импульсный трансформатор на ферритовом магнитопроводе;  $C_{соб.вв}$  – собственная емкость высоковольтной вторичной обмотки;  $C_H = 200$  пФ – нагрузочная емкость (два параллельно включенных конденсатора КВИ-2 100 пФ 20 кВ);  $МЗР$  – многозазорный разрядник;  $L_H$  – нагрузочная индуктивность, намотана одножильным многопроволочным проводом ПВ-3 сечением  $1 \text{ мм}^2$  на изолированном кольцевом ферритовом магнитопроводе МН  $120 \times 80 \times 8$ , количество витков в  $L_H$  равно 100;  $P$  – реактор с и.к.р.

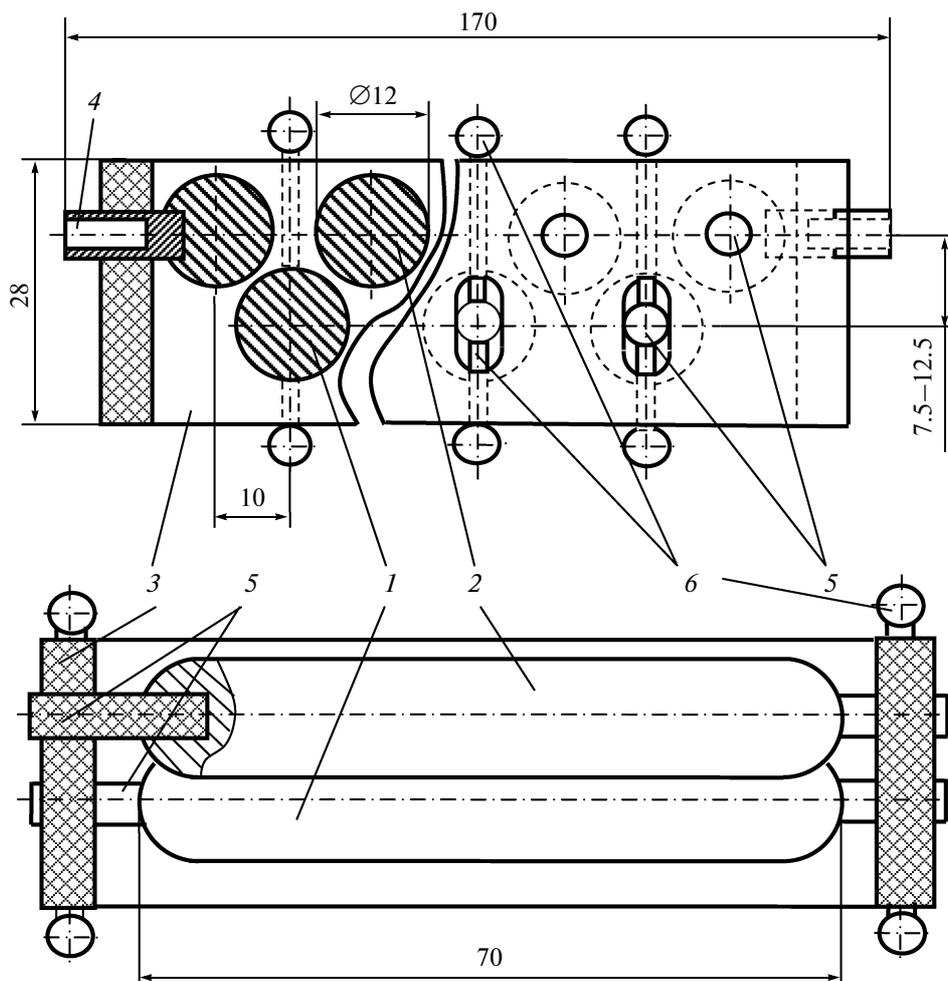


Рис. 8. Эскиз многозазорного разрядника. Даны проекции на параллельную (а) и перпендикулярную (б) направлению развития разряда плоскости; 1 – подвижные электроды; 2 – неподвижные электроды; 3 – корпус; 4 – вывод для подключения разрядника; 5 – стеклотекстолитовые изоляторы; 6 – винты, обеспечивающие регулировку рабочих зазоров разрядника.

Эскиз *МЗР* приведен на рис. 8. *МЗР* содержит четыре подвижных 1 и пять неподвижных 2 цилиндрических электродов. Это позволяет регулировать каждый из зазоров разрядника в диапазоне 0.2–2 мм. Эксперименты проводились преимущественно при величине зазоров в *МЗР* ~0.3 мм. При зазорах <0.2 мм по истечении некоторого времени стабильность работы разрядника нарушалась – это вызвано шунтированием зазоров продуктами разрядов. Увеличение зазоров свыше 0.5 мм также ухудшало стабильность работы *МЗР* при увеличении частоты следования импульсов. *МЗР* использовался как без обдува, так и с обдувом атмосферным воздухом во время работы.

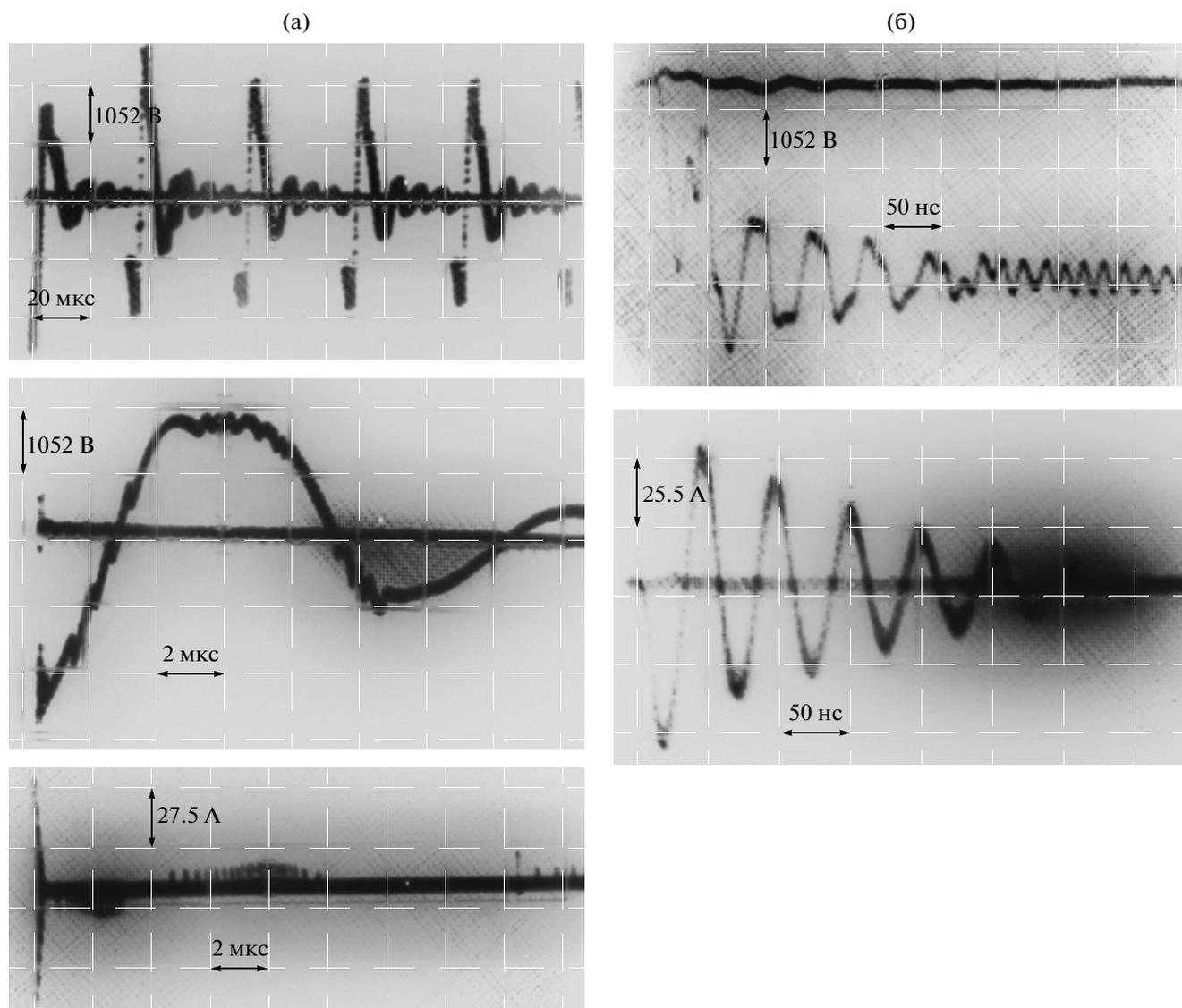
#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСЕКУНДНОГО ГЕНЕРАТОРА

Осциллограммы импульсов тока и напряжения на реакторе с и.к.р. при обострении фронта

импульсов по схеме, представленной на рис. 7, приведены на рис. 9. Верхняя осциллограмма на рис. 9а иллюстрирует стабильность импульсов с обостренным при помощи *МЗР* фронтом (до  $\approx 10$  нс) в реакторе при  $f_{\text{сл}} \approx 27000$  импульсов/с.

Наличие в схеме (рис. 7) индуктивности  $L_{\text{н}}$  позволяет регулировать длительность формируемых в реакторе импульсов. При этом, однако, ухудшается к.п.д. генератора, поскольку часть энергии выделяется в активном сопротивлении индуктивности  $L_{\text{н}}$ .

Эксперименты показали, что схема обострения на рис. 7 позволяет достичь частоты следования импульсов  $\approx 27000$  импульсов/с благодаря наличию паузы напряжения на *МЗР* после окончания очередного импульса до прихода следующего. Отсутствие напряжения на *МЗР* в указанный период позволяет достичь больших значений восстанавливающейся электрической прочности его зазоров (промежутков), большего увеличения их ак-



**Рис. 9.** Осциллограммы импульсов напряжения и тока на реакторе с и.к.р. по схеме рис. 7 при обострении фронта импульса: **а** – импульсы в целом (напряжение – две верхние осциллограммы, ток – нижняя осциллограмма); **б** – фронтальная (передняя) часть импульсов (напряжение – верхняя осциллограмма, ток – нижняя); рабочий зазор в реакторе  $d = 10$  мм, в МЗР два зазора по  $\sim 0.3$  мм,  $f_{\text{сл}} \approx 27000$  импульсов/с.

тивного сопротивления после каждого обостренного импульса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные генераторы в течение 2009–2010 гг. использовались в экспериментальных исследованиях различных режимов импульсных коронных разрядов с частотами следования импульсов 3000–50000 импульсов/с, амплитудой напряжений на реакторах до 10–12 кВ, при давлениях внутри реакторов и.к.р. от атмосферного до 1.5 атм избыточного давления. Генераторы показали высокие надежность и ресурс. Время непрерывной работы генератора достигало 8 ч при

частоте следования 40000 импульсов/с без перегрева, поскольку потери энергии минимизированы. Потребляемая из сети мощность для генератора микросекундных импульсов без обострения фронта составила 100 Вт при напряжении на реакторе  $U_p \approx 10$  кВ,  $f_{\text{сл}} \approx 20000$  импульсов/с, межэлектродном зазоре в реакторе  $d = 9$  мм, отрицательной полярности импульсов коронного разряда в реакторе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.

2. Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. Та ін. Техніка та електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. Харків: НТУ "ХПІ"—Торнадо, 2005.
3. Аношин О.А., Белогловский А.А., Верещагин И.П. и др. Высоковольтные электротехнологии. Уч. пос. по курсу "Основы электротехнологии" для студентов вузов/ Под ред. И.П. Верещагина. М.: Изд-во МЭИ, 2000.
4. Крстелев Е.Г., Масленников С.П., Школьников Э.Я. // ПТЭ. 2009. № 5. С. 98.
5. Сб. статей XXXI Всерос. семинара "Наука и технологии" / Под ред. В.В. Лунина, В.Г. Самойловича, С.Н. Ткаченко. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 121.
6. Лунин В.В., Карягин Н.В., Ткаченко С.Н. и др. Озон в очистке газовых выбросов, сельском хозяйстве и подготовке питьевой воды: Уч. пос. М.: МАКС Пресс, 2010.
7. Желтов К.А., Пальчевский А.Ю., Пучков Ю.Д. // ПТЭ. 2009. № 4. С. 102.
8. Mc Adams R. // Plasms Sources Sci. Technol. 2007. V. 16. P. 703.
9. Бойко Н.И. Патент № 71940 Украины, 7 С 01 В 13/10, 2005 и № 2211800 РФ, 7 С 01 В 13/11, 2003.
10. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. Л.: Энергия, 1980.