

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 631.373.54

КОММУТАТОРНЫЙ ИНДУКТИВНО-КОНДЕНСАТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

© 2020 г. Г. В. Носов^{а,*}, М. Г. Носова^{б,**}

^а *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30*

^б *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40*

**e-mail: nosov@tpu.ru*

***e-mail: nosovamgm@gmail.com*

Поступила в редакцию 03.02.2020 г.

После доработки 10.02.2020 г.

Принята к публикации 11.02.2020 г.

Исследован генератор, состоящий из маломощного источника с недостаточным для потребителя уровнем постоянного напряжения, полупроводникового ключа на IGBT-транзисторе, индуктивно-емкостного звена, тиристора, включаемого динисторами, и импульсного трансформатора. Генератор предназначен для электропитания различных потребителей мощными импульсами тока с частотой повторения до 100 Гц и более. Экспериментальные исследования опытной модели генератора показали, что по сравнению с маломощным источником (22 Вт, 13.8 В) импульсные значения мощности и напряжения у потребителя составили 2.47 кВт, 1122 В. При этом в сопротивлении потребителя (510 Ом) импульсы тока имели амплитуду 2.2 А, длительность 20 мкс и частоту повторения 50–167 Гц при напряжении источника 13.8–22.8 В. С увеличением постоянного напряжения источника питания число импульсов тока зарядки конденсатора снижалось, а частота импульсов тока в нагрузке возрастала. Максимальное напряжение на конденсаторе при его зарядке получено в 3–5 раз больше напряжения источника.

DOI: 10.31857/S0032816220040163

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА И РАБОТА ГЕНЕРАТОРА

Для электропитания многих потребителей мощными импульсами тока используются генераторы с электрическими конденсаторами, которые заряжаются от источника энергии постоянного напряжения (аккумулятор, выпрямитель, блок питания) и затем разряжаются на нагрузку (потребитель). К таким генераторам относится коммутаторный индуктивно-конденсаторный генератор с частотой повторения импульсов тока в нагрузке до 100 Гц и более. Задачей данной работы является исследование этого генератора при подключении его к источнику постоянного напряжения ограниченной мощности и с недостаточным для потребителя уровнем напряжения.

При недостаточном для потребителя уровне постоянного напряжения источника часто применяется промежуточное звено переменного тока, состоящее из инвертора, трансформатора и выпрямителя, от которого заряжаются конденсаторы [1, 2]. В работе [3] рассмотрены индуктивно-конденсаторные импульсные преобразователи

напряжения постоянного тока с полупроводниковым ключевым элементом – IGBT-транзистором, работающие в режиме питания потребителя непрерывным колеблющимся напряжением на конденсаторе.

Электрическая схема одного из этих преобразователей была использована в исследуемом генераторе как звено для повышения напряжения на заряжаемом сериями импульсов тока конденсаторе. Для дальнейшего повышения напряжения был применен импульсный трансформатор, к первичной обмотке которого тиристором подключается заряженный конденсатор, а к вторичной обмотке подсоединена нагрузка. Тиристор отпирается включением в цепи управления одного или нескольких последовательно соединенных динисторов, и конденсатор разряжается, генерируя импульс тока в нагрузке. Запирание тиристора осуществляется при снижении его тока до нулевого значения.

Электрическая схема исследуемого генератора с измерительными резисторами (1 Ом) представлена на рис. 1. Коммутатор K_1 (IGBT-транзистор) периодически замыкает и размыкает силовую

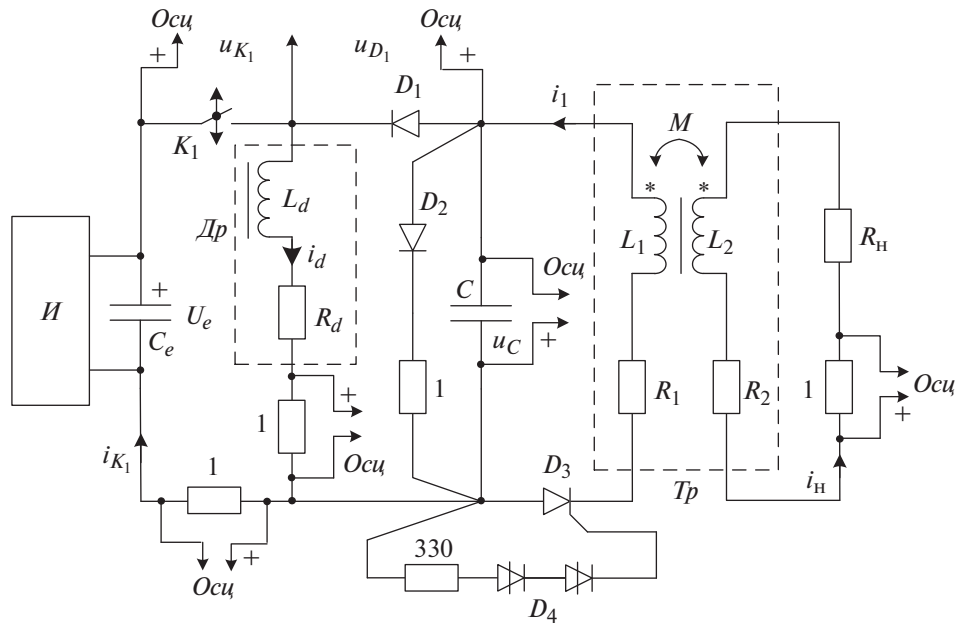


Рис. 1. Электрическая схема генерации и регистрации токов и напряжений. *I* – источник постоянного напряжения (канал блока питания Mastech HY3003D-2), *Osc* – цифровой осциллограф UNI-T модели UTD2025CL серии UTD-2000L, 25 МГц; *K*₁ – твердотельное реле постоянного тока 5П40.10GDA1-20-12-B88, $f = 500$ Гц; *D*₁, *D*₂ – диоды VS-HFA16TB120-N3 (16 А, 1200 В, 76 А/мкс), *D*₃ – тиристор T242-80-7 (80 А, 700 В), *D*₄ – динисторы КН102А и КН102Б; *Tr* – трансформатор: два ферритовых сердечника 2000НМ Ш 20 × 28, зазор 0.1 мм, $w_1 = 8$ витков, $w_2 = 250$ витков ($L_1 \approx 0.167$ мГн, $R_1 < 0.1$ Ом, $L_2 \approx 157$ мГн, $R_2 \approx 1.4$ Ом, $M \approx 5$ мГн); *Dr* – дроссель: два ферритовых сердечника 2000НМ Ш 20 × 28, зазор 2 мм, $w = 194$ витка ($L_d \approx 10.9$ мГн, $R_d \approx 0.4$ Ом); *C*_е – 3 электролита ЕСАР470уF/63V, 105°С (1410 мкФ, 63 В), *C* – 3 конденсатора СВВ-685-400V-685J-CL2 (20.9 мкФ, 400 В); *R*_н – резистор 5W510RJ-510 Ом, резисторы номиналом 1 Ом – 5W1RJ, 330 Ом – 5W330RJ.

цепь питания генератора с частотой f и скважностью $Q > 1$. При этом период коммутации T и интервалы времени t_1 (K_1 замкнут), t_2 (K_1 разомкнут) будут равны:

$$\begin{aligned} T &= 1/f, \quad t_1 = T/Q, \\ t_2 &= T - t_1 = T(Q - 1)/Q. \end{aligned} \quad (1)$$

При замкнутом коммутаторе K_1 , когда подключается источник I постоянного напряжения U_e , происходит накопление энергии в магнитном поле дросселя Dr , а при разомкнутом K_1 , когда отключается источник I , эта энергия передается в электрическое поле конденсатора C , который за несколько периодов T коммутации K_1 заряжается до максимального напряжения U_{mC} .

Это напряжение определяется напряжением включения динисторов D_4 , которые при достижении напряжения конденсатора величины U_{mC} отпирают тиристор D_3 , конденсатор разряжается на первичную обмотку трансформатора Tr и в нагрузку R_n генерируется импульс тока i_n . Заряд и разряд конденсатора, а также генерирование импульсов тока i_n периодически повторяются с частотой $f_n < f$. С целью разделения во времени про-

цессов накопления энергии в дросселе и конденсаторе установлен полупроводниковый диод D_1 , а для предотвращения возможного появления отрицательного напряжения на конденсаторе при его разрядке подключен полупроводниковый диод D_2 .

При зарядке конденсатора возможны два режима: режим непрерывного тока дросселя i_d , когда этот ток в течение большинства периодов T коммутации K_1 не достигает нулевого значения; режим импульсного тока дросселя, когда этот ток в течение большинства периодов коммутации K_1 достигает нулевого значения. Исходя из необходимости периодического запираания тиристора D_3 после разрядов конденсатора, режим импульсного тока дросселя представляется наиболее приемлемым.

Если при индуктивности L_d , сопротивлении R_d и постоянной времени $\tau_d = L_d/R_d$ дросселя его добротность $q = 2\pi f \tau_d \gg 1$, то тогда без учета измерительных резисторов (1 Ом) для обеспечения режима импульсного тока дросселя емкость C конденсатора должна удовлетворять условию:

$$C_m = \frac{4t_2^2}{\pi^2 L_d} > C. \quad (2)$$

ОПЫТНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА

Опытная модель генератора составлена из следующих элементов на рис. 1.

В качестве источника I постоянного напряжения U_e использован один канал регулируемого двухканального блока питания Mastech HY3003D-2 (Китай, г. Гонконг, MASTECH) с максимальными выходными значениями одного канала 30 В, 3 А. Для уменьшения амплитуд напряжений на коммутаторе K_1 и на внутренних элементах источника при размыкании коммутатора K_1 к выходу блока питания подключены три параллельно соединенных электролитических конденсатора ЕСАР470uF/63V, 105°C (Тайвань) с суммарной емкостью $C_e \approx 1410$ мкФ и напряжением до 63 В (аналоги конденсатора К50-35).

Управляемым коммутатором K_1 служит твердотельное реле постоянного тока 5П40.10GDA1-20-12-B88 (Россия, г. Орел, ЗАО “Протон-Импульс”) на IGBT-транзисторе с параметрами: размыкаемый ток до 20 А; максимальное напряжение в разомкнутом состоянии до 1200 В; частота коммутации до 100 кГц; время коммутации 5 мкс; остаточное напряжение в замкнутом состоянии $U_{ост} < 2.5$ В, причем измеренное среднее его значение оказалось равным $U_{ост} \approx 1.4$ В.

Для защиты силовые выходные зажимы реле K_1 шунтируются варистором СН2-1А на 1200 В (Россия, г. Королёв, “АС Энергия”) и параллельным варистору встречно подключенным диодом VS-HFA16TB120-N3 (www.vishay.com) с параметрами 16 А, 1200 В, 76 А/мкс (оба на рис. 1 не показаны).

Управление работой реле осуществляется однопольными прямоугольными импульсами напряжения u_y с амплитудой 8 В при скважности $Q = 2$ и частоте $f = 500$ Гц, которые через токоограничивающий резистор 426.6 Ом подаются на вход реле, что обеспечивает импульсный входной ток 15 мА. Условные силовые контакты реле K_1 при напряжении управления $u_y = 0$ разомкнуты, а при $u_y = 8$ В — замкнуты.

К зажимам питания реле через токоограничивающий резистор 50 Ом подключается источник постоянного напряжения 12–15 В, ток питания не более 30 мА. В качестве источника прямоугольных импульсов напряжения управления и источника питания реле использованы регулируемые источники лабораторного комплекса ЭД-1 (Россия, г. Челябинск, ООО “Учебная техника”), которые на рис. 1 не показаны. В результате коммутатор K_1 при частоте $f = 500$ Гц и скважности

$Q = 2$ согласно (1) обеспечивает: $T = 2$ мс, $t_1 = t_2 = 1$ мс.

Для импульсного периодического накопления энергии в магнитном поле изготовлен дроссель Dr с магнитопроводом из двух Ш 20 × 28 сердечников из феррита 2000НМ (Россия, г. Санкт-Петербург, “Ферроприбор”). У магнитопровода между сердечниками предусмотрен воздушный зазор 2 мм. Обмотка дросселя с числом витков $w = 194$ выполнена проводом ПЭТ-155 с диаметром по меди 1.18 мм, между слоями провода в качестве изоляции размещена лавсановая пленка толщиной 0.1 мм. Измеренные параметры дросселя при 25°C: $L_d \approx 10.9$ мГн, $R_d \approx 0.4$ Ом, масса 0.7 кг, тогда $\tau_d \approx 27$ мс $\gg t_1$, $q \approx 85.6 \gg 1$.

Диоды D_1 и D_2 взяты одинаковыми типа VS-HFA16TB120-N3 (www.vishay.com) с параметрами 16 А, 1200 В, 76 А/мкс.

Согласно условию (2), когда $C_m \approx 37.2$ мкФ, выбираем конденсатор, выполненный в виде трех параллельно соединенных пленочных конденсаторов СВВ-685-400V-685J-CL2 (Китай, ELEC-YINGFO) с суммарной измеренной емкостью $C = 20.9$ мкФ и с предельным напряжением 400 В.

Для подключения заряженного конденсатора к первичной обмотке трансформатора Tr применен низкочастотный тиристор (D_3) T242-80-7 (Россия, г. Саранск, “Электровыпрямитель”) с параметрами: средний ток 80 А, повторяющееся напряжение в закрытом состоянии 700 В. Для отпираания этого тиристора использовано в цепи его управления последовательное соединение токоограничивающего резистора 330 Ом 5W330RJ и двух динов (D_4) КН102А и КН102Б (www.katod-anod.ru/rd/kn102) с паспортными значениями напряжений включения 20 и 28 В соответственно. Экспериментально их напряжение включения оказалось примерно одинаковым и равным 36 В, а при их последовательном соединении напряжение включения составило 72 В. В результате максимальное напряжение на конденсаторе должно быть равно $U_{mc} \approx 72$ В.

Запирание тиристора происходит при снижении его тока i_1 до нулевого значения, поэтому длительность импульса тока i_1 должна быть существенно меньше интервала времени $t_2 = 1$ мс (1), что обеспечивается величиной емкости конденсатора ($C = 20.9$ мкФ), параметрами трансформатора (L_1, L_2, M, R_1, R_2) и нагрузки (R_n).

Для повышения напряжения на нагрузке R_n по сравнению с максимальным напряжением на конденсаторе U_{mc} был изготовлен импульсный трансформатор Tr с магнитопроводом из таких же, как у дросселя, двух Ш 20 × 28 сердечников из феррита 2000НМ. У магнитопровода между сердечниками для их размагничивания при однопольных им-

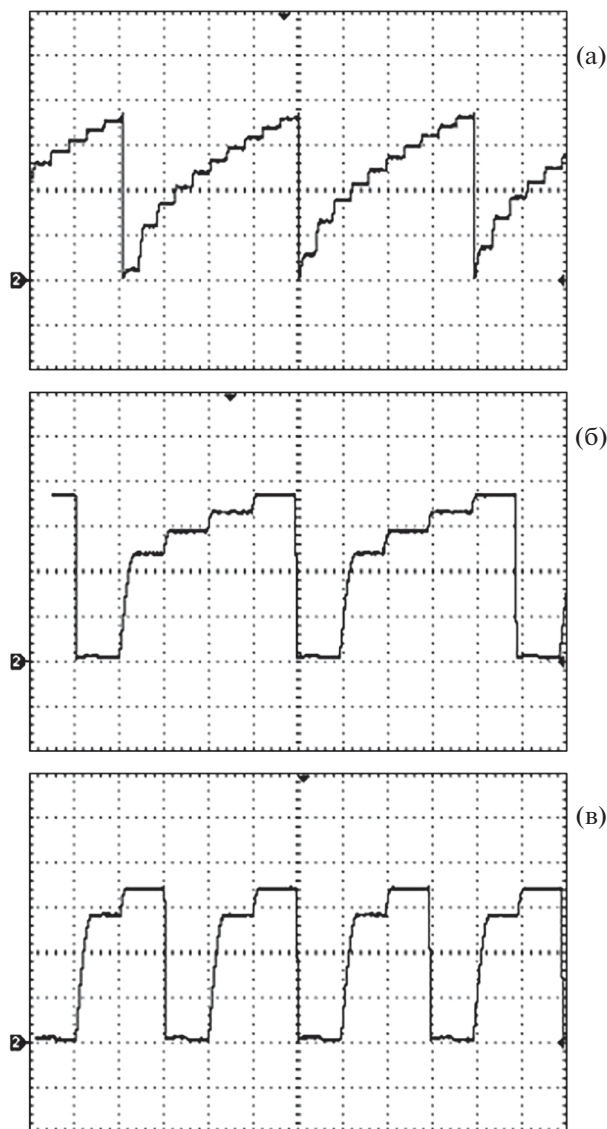


Рис. 2. Осциллограммы напряжения u_C на конденсаторе: **а** — при напряжении источника $U_e \approx 13.8$ В, развертка 5 мс/деление; **б** — при $U_e \approx 19.5$ В, 2 мс/деление; **в** — при $U_e \approx 22.8$ В, 2 мс/деление. Масштаб по вертикали 20 В/деление. Левая метка — нулевой уровень.

пульсах тока i_1 предусмотрен воздушный зазор 0.1 мм.

Первичная (внешняя) и вторичная (внутренняя) обмотки расположены на общем пластмассовом каркасе с толщиной стенок 1.25 мм. Первичная обмотка выполнена однослойной и состоит из трех параллельных обмоток, каждая из которых изготовлена проводом ПЭТ-155 с диаметром по меди 1.18 мм и с числом витков $w_1 = 8$. Вторичная обмотка имеет число витков $w_2 = 250$ и намотана проводом ПЭТ-155 с диаметром провода по меди 0.8 мм, между слоями этого провода размещена лавсановая пленка толщиной 0.1 мм.

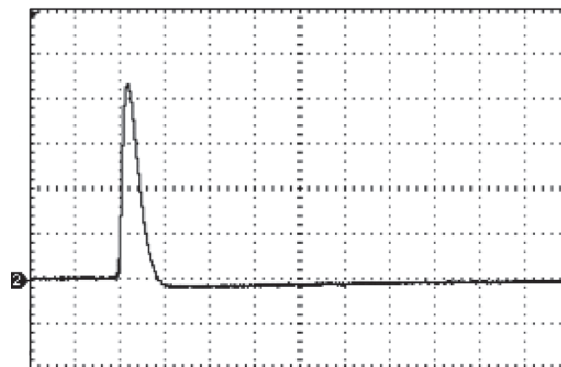


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на резисторе 1 Ом, соответствующая току i_H в нагрузке $R_H = 510$ Ом. Масштаб по вертикали 500 мВ/деление, по горизонтали — 50 нс/деление. Левая метка — нулевой уровень.

Между первичной и вторичной обмотками расположена изоляция толщиной 0.6 мм из электроизоляционной ПВХ-ленты, которая при толщине 0.15 мм заявлена изготовителем на пробивное напряжение 6 кВ, предположительно рассчитанного на 1 мм (Китай, Safeline). Измеренные параметры трансформатора при 25°C: $L_1 \approx 0.167$ мГн, $R_1 < 0.1$ Ом, $L_2 \approx 157$ мГн, $R_2 \approx 1.4$ Ом, $M \approx 5$ мГн, $w_2/w_1 \approx 31$, масса 0.7 кг.

В качестве нагрузки использован резистор 5W510RJ с сопротивлением $R_H = 510$ Ом. Для регистрации напряжений применен цифровой осциллограф (Осц) UNI-T модели UTD2025CL серии UTD-2000L (Китай, г. Дунгуань, Uni-Trend Technology Limited). При этом для регистрации токов используются напряжения, которые снимаются с измерительных резисторов 1 Ом (5W1RJ). Такой же резистор размещен в цепи диода D_2 для преобразования в тепло остатков энергии конденсатора при возможном изменении полярности его напряжения при разрядке. Резисторы 5W1RJ, 5W330RJ, 5W510RJ изготовлены в России, г. Королёв, “АС Энергия”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения u_C на конденсаторе при различных выходных напряжениях блока питания U_e , на основании которых найдены значения $U_{mc} \approx 72$ В, период T_c напряжения u_C , f_H , число импульсов тока зарядки конденсатора N , $K_{UC} \approx U_{mc}/U_e$: рис. 2а — $U_e \approx 13.8$ В, $N \approx 10$, $T_c \approx 0.02$ с, $f_H \approx 50$ Гц, $K_{UC} \approx 5.2$; рис. 2б — $U_e \approx 19.5$ В, $N \approx 5$, $T_c \approx 0.01$ с, $f_H \approx 100$ Гц, $K_{UC} \approx 3.7$; рис. 2в — $U_e \approx 22.8$ В, $N \approx 3$, $T_c \approx 0.006$ с, $f_H \approx 167$ Гц, $K_{UC} \approx 3.2$.

На рис. 3 представлена осциллограмма, соответствующая току i_H в нагрузке $R_H = 510$ Ом, на основании которой можно найти: длительность им-

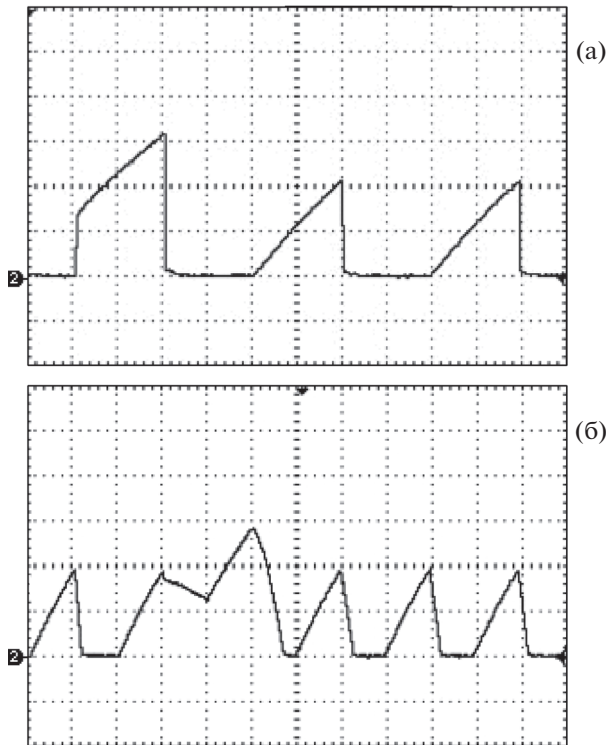


Рис. 4. Осциллограммы напряжений на резисторах 1 Ом, соответствующие: **а** — току i_{K1} коммутатора K_1 , развертка 500 мкс/деление; **б** — току i_d дросселя, развертка 1 мс/деление. Напряжение источника $U_e \approx 13.8$ В. Масштаб по вертикали 500 мВ/деление. Левая метка — нулевой уровень.

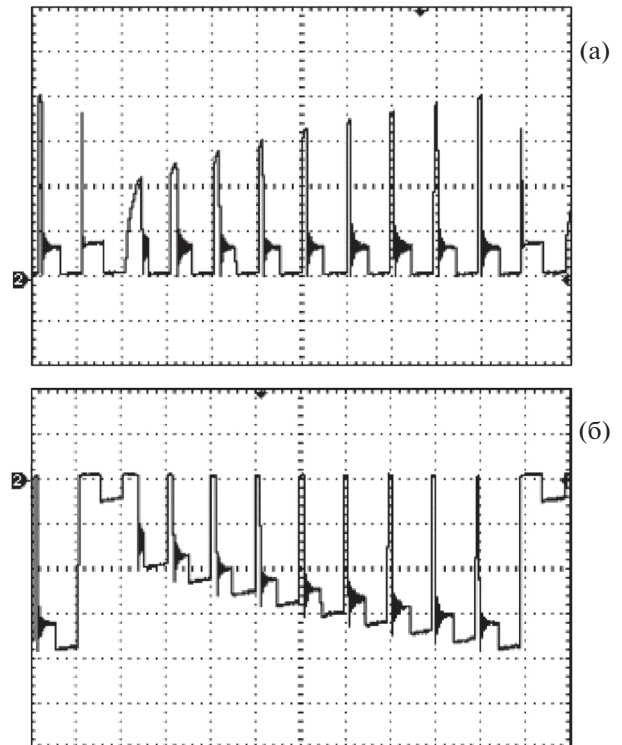


Рис. 5. Осциллограммы: **а** — напряжение u_{K1} на коммутаторе K_1 ; **б** — напряжение u_{D1} на диоде D_1 . Напряжение источника $U_e \approx 13.8$ В. Масштаб по вертикали 20 В/деление, по горизонтали — 2 мс/деление. Левая метка — нулевой уровень.

пульса тока i_n на половине его амплитуды 20 мкс, амплитуду этого тока $I_{mn} \approx 2.2$ А, амплитуду напряжения на нагрузке $U_{mn} = R_n I_{mn} \approx 1122$ В, амплитуду мощности нагрузки $P_{mn} = U_{mn} I_{mn} \approx 2.47$ кВт, при $U_e \approx 13.8$ –22.8 В коэффициент повышения напряжения $K_U = U_{mn}/U_e \approx 81$ –49. Амплитуду тока i_1 в первичной обмотке трансформатора можно оценить так: $I_{m1} \approx (w_2/w_1) I_{mn} \approx 69$ А.

Работа генератора также иллюстрируется осциллограммами на рис. 4 и 5, которым соответствует напряжение u_C на рис. 2а при $U_e \approx 13.8$ В и $N \approx 10$.

На рис. 4а показана осциллограмма напряжения на резисторе 1 Ом, подобная току i_{K1} коммутатора K_1 . Импульс тока i_{K1} с амплитудой 1.6 А соответствует зарядке и разрядке конденсатора, а импульсы с амплитудой 1.05 А — только зарядке конденсатора. В результате при максимальной генерируемой мощности блока питания $P_{me} = 13.8 \cdot 1.6 \approx 22$ Вт коэффициент усиления мощности составил $K_P = P_{mn}/P_{me} \approx 112$.

На рис. 4б представлена осциллограмма напряжения на резисторе 1 Ом, соответствующая току i_d дросселя. Сдвоенный импульс тока i_d с амплитудой 1.4 А соответствует зарядке и разрядке конденсатора, а импульсы с амплитудой 0.95 А — только зарядке конденсатора.

Приблизленно наибольшее максимальное значение напряжения u_{K1} можно рассчитать так: $U_{mK1} \approx U_e + U_{mC} = 85.8$ В, которое примерно соответствует экспериментальной величине 80 В.

На рис. 5а приведена осциллограмма напряжения u_{K1} на коммутаторе K_1 , отражающая процесс работы генератора: девять нарастающих по амплитуде импульсов напряжения соответствуют зарядке конденсатора, а десятый импульс напряжения очевидно соответствует зарядке и разрядке конденсатора. На рис. 5б показана осциллограмма напряжения u_{D1} на диоде D_1 : при отрицательных значениях напряжения диод D_1 заперт, а при $u_{D1} \geq 0$ — открыт. Девять нарастающих по модулю амплитуды импульсов напряжения u_{D1} соответствуют зарядке конденсатора, а десятый импульс с наименьшей по модулю амплитудой напряже-

ния u_{D_1} , очевидно, соответствует зарядке и разрядке конденсатора. Наименьшее запирающее диод D_1 напряжение u_{D_1} можно приближенно оценить так: $U_{mD_1} \approx -U_{mK_1} = -85.8$ В, которое близко к экспериментальному значению -76 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован коммутаторный индуктивно-конденсаторный генератор с полупроводниковым ключевым элементом — IGBT-транзистором, опытная модель которого на активной нагрузке $R_n = 510$ Ом генерировала импульсные значения мощности и напряжения: $P_{mn} \approx 2.47$ кВт, $U_{mn} \approx 1122$ В. При изменении напряжения источника $U_e = 13.8\text{--}22.8$ В коэффициент повышения напряжения получился равным $K_U = U_{mn}/U_e \approx 81\text{--}49$, а при напряжении источника $U_e = 13.8$ В и его мощности $P_{me} \approx 22$ Вт коэффициент усиления импульсной мощности составил $K_P = P_{mn}/P_{me} \approx 112$. Опытная модель ге-

нератора при этих параметрах работала надежно без регулировок и отключений, обеспечивая в нагрузке импульсы тока с амплитудой 2.2 А, длительностью 20 мкс и с частотой повторения 50—167 Гц при изменении напряжения источника $U_e = 13.8\text{--}22.8$ В. С увеличением напряжения источника питания U_e число импульсов N тока зарядки конденсатора снижалось, а частота f_n импульсов тока в нагрузке возрастала. Максимальное напряжение на конденсаторе ($U_{mc} \approx 72$ В) при его зарядке получено в $K_{UC} \approx 5\text{--}3$ раз больше напряжения источника ($U_e = 13.8\text{--}22.8$ В).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко Ю.В., Пурескин Д.Н., Савкин В.Я., Сеньков Д.В., Яковлев Д.В. // ПТЭ. 2016. № 6. С. 28. <https://doi.org/10.7868/S0032816216050116>
2. Лившиц А.Л., Отто М.А. Импульсная электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 225.
3. Шабалин Н.Г., Феоктистов В.П., Иньков Ю.М. // Электротехника. 2011. № 8. С. 33.