

УДК 621.314.222

ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

Г. В. Носов, С. В. Пустынников, Е. О. Кулешова,
М. Г. Носова*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

* Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия

E-mails: nosov@tpu.ru, pustynnikov@tpu.ru, kuleshova@tpu.ru, nosovamgm@gmail.com

Предложена конструкция генератора с энергией импульса более 1 МДж при его подключении к внешнему источнику постоянного напряжения с ограниченными силой тока и мощностью. Численно и аналитически рассчитывается электропитание активно-индуктивного потребителя. Определяются параметры генератора для реализации частотно-импульсного режима работы. Приводятся результаты экспериментального исследования малогабаритного трансформаторного генератора, которые подтверждают эффективность работы рассматриваемого генератора и достоверность методики расчета его характеристик.

Ключевые слова: генератор, индуктивный накопитель, трансформатор, коммутатор, импульс тока, активный потребитель.

DOI: 10.15372/PMTF20200217

Введение. Для электропитания ряда активно-индуктивных потребителей, таких как рельсотроны и установки импульсной электросварки, электрогидравлической и магнитно-импульсной обработки металлов, импульсные плазмотроны, необходимы мощные импульсы тока. При этом для работы крупных электрофизических установок, применяемых при проведении фундаментальных и прикладных исследований, требуется энергия импульса более 1 МДж с амплитудой тока, достигающей нескольких сотен килоампер. При разработке генераторов мощных импульсов электрического тока необходимо исследовать характеристики источника энергии, коммутаторов, электрической изоляции и др. [1–4].

При наличии источника электромагнитной энергии с постоянным напряжением и ограниченными силой тока и мощностью (электромашинный генератор или электрическая сеть с выпрямителем) импульсы тока, мощность которых существенно больше мощности источника, могут быть получены с использованием промежуточных емкостных и индуктивных накопителей электромагнитной энергии. Емкостные накопители с импульсными конденсаторами и накопленной энергией, составляющей более 1 МДж, имеют значительные габариты. Плотность энергии, запасаемой энергоемкими конденсаторами (ионисторами), более чем в 10 раз превышает плотность энергии, запасаемой импульсными конденсаторами, что позволяет значительно уменьшить массу и размеры накопителя. Однако

недостаточные для многих потребителей напряжение и сила тока, а также большая длительность импульсов тока ограничивают применение энергоемких конденсаторов. Более приемлемыми по массогабаритным параметрам являются криопроводниковые индуктивные накопители, которые способны генерировать импульсы тока малой длительности с использованием мощных высоковольтных коммутаторов при охлаждении обмоток накопителя до криогенных температур для достижения плотности тока более 100 А/мм^2 и удельной запасаемой энергии до 5 кДж/кг . Однако во многих случаях необходимо увеличивать силу тока источника до требуемой величины [2–7].

Таким образом, разработка конструкции и методики расчета характеристик генератора мощных импульсов тока при его подключении к источнику постоянного напряжения с ограниченными силой тока и мощностью при энергии импульса более 1 МДж является актуальной задачей.

Конструкция и работа генератора. В данной работе предлагается конструкция трансформаторного генератора импульсов тока, который подключается к внешнему источнику постоянного напряжения и предназначен для электропитания потребителя как в режиме одиночных импульсов тока, так и в частотно-импульсном режиме, в случае когда источник постоянного напряжения содержит трехфазный источник энергии (электромашинный генератор или электрическую сеть), трехфазный трансформатор и выпрямитель (рис. 1).

Будем считать, что внешний генератор постоянного напряжения представляет собой источник постоянной ЭДС E и последовательно соединенные внутреннее сопротивление R_e и внутреннюю индуктивность L_e , а потребитель импульсов тока — активно-индуктивную нагрузку, также состоящую из последовательно соединенных активного сопротивления R_H и индуктивности L_H .

Ограничимся исследованием работы генератора при мгновенном срабатывании идеальных коммутаторов. Будем полагать, что паразитные емкости обмоток трансформатора и других элементов генератора незначительны, поэтому при расчетах их можно не учитывать. Также будем считать, что индуктивности конденсаторов незначительны и не оказывают значительного влияния на импульсы напряжений и токов генератора с миллисекундной длительностью, при этом учитываются внутренние сопротивления энергоемких конденсаторов (ионисторов) [6]. Сопротивления и индуктивности соединительных проводов малы и добавляются к сопротивлениям и индуктивностям внешнего источника, обмоток трансформатора и потребителя импульсов тока.

Электрическая схема трансформаторного генератора представлена на рис. 2 (K_0 — ключ запуска электропитания генератора, K_1 — управляемый коммутатор, K_2, K_3, K_4 — неуправляемые коммутаторы в виде групп полупроводниковых диодов, C_1, C_2 — емкости групп конденсаторов, R_{C_1} — эквивалентное сопротивление группы энергоемких конденсаторов C_1 , R_k — сопротивление коммутационного резистора, $L_1, L_2, M = K_{cv}\sqrt{L_1L_2}$

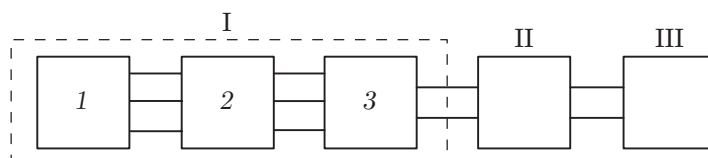


Рис. 1. Блок-схема электропитания потребителя импульсов тока:

I — внешний источник постоянного напряжения, II — трансформаторный генератор импульсов тока, III — потребитель; 1 — трехфазный источник энергии, 2 — трехфазный трансформатор, 3 — выпрямитель

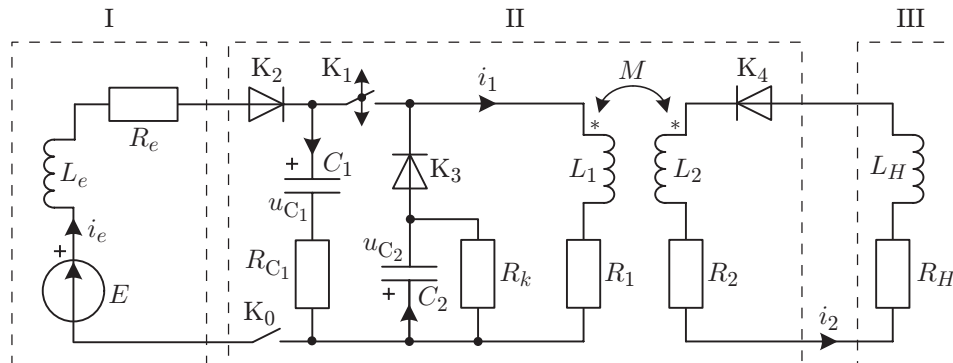


Рис. 2. Электрическая схема трансформаторного генератора:
 I — источник, II — генератор, III — потребитель импульсов тока

и R_1 , R_2 — индуктивности и сопротивления согласно включенных обмоток трансформатора генератора при коэффициенте связи $K_{cv} < 1$; “*” — одноименно заряженные зажимы обмоток трансформатора; i_e , i_1 , i_2 и u_{C1} , u_{C2} — соответственно силы тока и напряжения на конденсаторах, являющиеся функциями времени).

Энергоемкие C_1 и импульсные C_2 конденсаторы необходимы для уменьшения напряжений на элементах источника, трансформатора и коммутатора K_1 при размыкании его контактов. Конденсаторы C_1 , C_2 представляют собой группы выбранных конденсаторов определенного типа, которые соединяются между собой последовательно и параллельно для получения необходимых величин суммарных емкостей, напряжений и токов. Коммутационный резистор R_k используется для разрядки конденсаторов C_2 .

В зависимости от величин сил тока i_e , i_1 , i_2 и напряжений выбираются соответствующие полупроводниковые диоды, которые в группах K_2 , K_3 , K_4 соединяются между собой последовательно и параллельно. Диоды K_2 необходимы для формирования импульсов тока источника i_e и создания максимального напряжения на группе конденсаторов C_1 . Диоды K_3 , K_4 предназначены для накопления энергии в магнитном поле первичной обмотки (с индуктивностью L_1 и сопротивлением R_1) трансформатора и формирования импульсов тока i_2 при размыкании коммутатора K_1 . В качестве коммутатора K_1 необходимо использовать специальный быстродействующий выключатель постоянного тока [8].

Двухобмоточный трансформатор генератора служит для накопления энергии в магнитном поле первичной обмотки, а также для согласования сил тока внешнего источника и потребителя. При величине накапливаемой энергии более 1 МДж необходимо использовать трансформатор без магнитопровода (воздушный трансформатор) с двумя многослойными цилиндрическими обмотками, слои которых чередуются друг с другом. Можно изготовить такой трансформатор с высоким коэффициентом связи между обмотками, которые для увеличения плотности тока и накопленной энергии следует охладить до криогенных температур. Так, при изготовлении обмоток трансформатора из особо чистой меди (99,999 %) и охлаждении их до температуры жидкого водорода (20 К) сопротивление обмоток уменьшается в 1430 раз по сравнению с сопротивлением при температуре, равной 20 °С, что позволяет существенно снизить потери энергии, повысить плотность тока в обмотках и увеличить накапливаемую энергию. При этом для охлаждения обмоток между проводниками необходимо наличие каналов для пропускания жидкого водорода [3, 5, 7].

При замыкании ключа K_0 , когда контакты коммутатора K_1 разомкнуты, группа конденсаторов C_1 заряжается током i_e до некоторого напряжения u_{C1} , которое в большинстве случаев больше или равно ЭДС E источника, диоды K_2 запираются. После замыкания в определенный момент времени ($t = 0$) контактов коммутатора K_1 сила тока i_1 увеличива-

ется от нулевого значения. Происходит накопление энергии в магнитном поле первичной обмотки трансформатора. В определенный момент времени ($t = t_{m1}$) контакты коммутатора K_1 размыкаются, ток первичной обмотки i_1 начинает протекать через группу конденсаторов C_2 , резистор R_k и диоды K_3 , уменьшаясь до нулевого значения. Практически одновременно в результате подачи напряжения взаимной индукции во вторичной обмотке трансформатора диоды K_4 отпираются, и генерируется импульс тока i_2 , который передает большую часть накопленной энергии магнитного поля трансформатора потребителю.

При частоте f срабатываний коммутатора K_1 в момент времени $t = t_{m1} + t_p = T = 1/f$ (t_p — интервал времени, в течение которого используется накопленная энергия), когда $i_1 = i_2 = i_e = 0$ и $u_{C_2} = 0$, рассматриваемый цикл работы генератора заканчивается. После нескольких циклов устанавливаются максимальные значения сил токов и напряжений:

$$u_{C_1}(0) = U_{mC_1}, \quad i_1(t_{m1}) = I_{m1}, \quad i_2(t_{m2}) = I_{m2}, \quad u_{C_2}(t_{m2}) = U_{mC_2}, \quad i_e(t_{me}) = I_{me}. \quad (1)$$

Здесь $t = 0$ и $t = t_{m1}$ — моменты замыкания и размыкания коммутатора K_1 ; $t_{m2} = t_{m1} + t_k$ — момент запираания диодов K_3 и достижения максимальной силы тока i_2 ; t_k — время коммутации, за которое сила тока i_1 уменьшается от максимального значения I_{m1} до нуля, а сила тока i_2 достигает максимального значения I_{m2} ; $t = t_{me}$ — момент времени, в который достигается максимальное значение силы тока i_e при скважности q работы коммутатора K_1 ($t_{me} < T = qt_{m1}$).

Таким образом, для генерирования серии импульсов тока i_2 необходимо управление лишь коммутатором K_1 , что позволяет упростить и автоматизировать работу генератора.

Методика расчета. Для определения сил тока и напряжений генератора (см. рис. 2) использовались следующие уравнения:

$$\begin{aligned} E &= L_e \frac{di_e}{dt} + (R_e + R_{K_2})i_e + u_{C_1} + R_{C_1}(i_e - i_1), & i_e &= i_1 + C_1 \frac{du_{C_1}}{dt}, \\ u_{C_1} + R_{C_1}(i_e - i_1) &= L_1 \frac{di_1}{dt} + (R_1 + R_{K_1})i_1, & i_1 &= \frac{u_{C_2}}{R_k} + C_2 \frac{du_{C_2}}{dt}, \\ L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + (R_1 + R_{K_3})i_1 + u_{C_2} &= 0, \\ (L_2 + L_H) \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + (R_2 + R_{K_4} + R_H)i_2 &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $R_{K_1}, R_{K_2}, R_{K_3}, R_{K_4}$ — сопротивления коммутаторов, которые были соответственно равными нулю при замкнутом коммутаторе K_1 и незапертых диодах K_2, K_3, K_4 и полагались достаточно большими при разомкнутом коммутаторе K_1 и запертых диодах K_2, K_3, K_4 .

Уравнения (2) решались численно и аналитически. С использованием аналитического решения получены следующие результаты.

1. На интервале времени $t_{m1} < t < t_{m2} = t_{m1} + t_k$ при начальных условиях

$$i_1(t_{m1}) = I_{m1}, \quad i_2(t_{m1}) = 0, \quad u_{C_2}(t_{m1}) = 0,$$

когда при размыкании коммутатора K_1 диоды K_3 и K_4 отпираются, имеем

$$\begin{aligned} i_1 &\approx I_{m1} \left(1 - \frac{t - t_{m1}}{t_k}\right), & i_2 &\approx I_{m2} \frac{t - t_{m1}}{t_k}, & u_{C_2} &\approx I_{m1} \frac{t - t_{m1}}{C_2} - I_{m1} \frac{(t - t_{m1})^2}{2C_2 t_k}, \\ I_{m2} &\approx \frac{MI_{m1}}{L_2 + L_H + 0,5(R_2 + R_H)t_k}, & U_{mC_2} &\approx \frac{t_k I_{m1}}{2C_2}, & t_k^3 + r_2 t_k^2 + r_1 t_k + r_0 &\approx 0, \\ r_2 &= \frac{2(L_2 + L_H)}{R_2 + R_H}, & r_1 &= -3L_1 C_2, & r_0 &= -\frac{6[L_1(L_2 + L_H) - M^2]C_2}{R_2 + R_H}. \end{aligned} \quad (3)$$

2. На интервале времени $t_{m2} < t < T$ при начальных условиях

$$i_1(t_{m2}) = 0, \quad i_2(t_{m2}) = I_{m2}, \quad u_{C_2}(t_{m2}) = U_{mC_2},$$

когда при размыкании коммутатора K_1 диоды K_3 запираются, а диоды K_4 не заперты, имеем

$$i_1 = 0, \quad i_2 = I_{m2} \exp\left(-\frac{(R_2 + R_H)(t - t_{m2})}{L_2 + L_H}\right), \quad u_{C_2} = U_{mC_2} \exp\left(-\frac{t - t_{m2}}{R_k C_2}\right). \quad (4)$$

При генерировании одного импульса тока i_2 на основе численного и аналитического расчета уравнений (2)–(4) с учетом начальных условий (1) определены параметры генератора и получены формулы для их расчета. К числу этих параметров относятся переданная источником ЭДС энергия W_E ; накопленная в магнитном поле трансформатора энергия W_{L1} ; максимальная активная мощность потребителя P_{mH} ; длительность импульса максимальной активной мощности t_u ; выделившаяся энергия W_H в активном сопротивлении потребителя R_H ; эффективность накопления энергии η_1 , эффективность передачи накопленной энергии потребителю η_2 и полная эффективность работы генератора η ; длительность t_i импульса тока i_2 на половине его амплитуды:

$$\begin{aligned} W_E &= E \int_0^T i_e dt, & W_{L1} &= \frac{L_1 I_{m1}^2}{2}, & t_u &\approx \frac{t_k}{3} + \frac{L_2 + L_H}{2(R_2 + R_H)}, \\ P_{mH} &= I_{m2}^2 R_H, & W_H &\approx P_{mH} t_u, & & \\ \eta_1 &= \frac{W_{L1}}{W_E}, & \eta_2 &= \frac{W_H}{W_{L1}}, & \eta &= \eta_1 \eta_2 = \frac{W_H}{W_E}, & t_i &\approx \frac{t_k}{2} + \frac{(L_2 + L_H) \ln 2}{R_2 + R_H}. \end{aligned} \quad (5)$$

На основе анализа результатов вычислений сформулированы требования к параметрам генератора, обеспечивающим частотно-импульсный режим его работы. Так, в течение периода T следования импульсов тока i_2 группа конденсаторов C_1 должна периодически заряжаться до максимального напряжения U_{mC_1} , а диоды K_2 — открываться и запираются. Напряжение u_{C_2} и сила тока i_2 должны уменьшаться до нуля, причем на интервале времени $t_{m2} < t < T$ диоды K_3 должны быть заперты. Для уменьшения потерь энергии сопротивление R_k должно быть максимальным, а емкость C_2 — минимальной. Этим требованиям удовлетворяют следующие соотношения для параметров генератора:

$$\begin{aligned} t_k &\ll R_k C_2, & t_k &\ll T - t_{m1}, & q &= T/t_{m1} > 1, \\ I_{y1} &= \frac{E}{R_e + R_1} > I_{m1}, & \tau &= \frac{L_e + L_1}{R_e + R_1}, & f &\approx \left[q\tau \ln\left(\frac{I_{y1}}{I_{y1} - I_{m1}}\right) \right]^{-1}, & \frac{5R_k C_2}{T - t_{m1}} &< 1, \\ \frac{5(L_2 + L_H)}{(R_2 + R_H)(T - t_{m1})} &< 1, & L_{e1} &= \frac{L_e L_1}{L_e + L_1}, & C_1 &\geq \frac{q^2 t_{m1}^2}{8\pi^2 L_{e1} [1 + q^2 t_{m1}^2 R_{C_1}^2 / (16\pi^2 L_{e1}^2)]}, \\ C_2 &> \frac{L_2 + L_H}{R_k(R_2 + R_H)}, & C_2 &> \frac{2M^2}{R_k^2(R_2 + R_H)t_k}, & f &< \frac{(q-1)(R_2 + R_H)}{5q(L_2 + L_H)}. \end{aligned} \quad (6)$$

При этом величина ЭДС E определяется требуемыми значениями сил тока, а величины C_2 , R_k — допустимыми максимальными напряжениями на коммутаторе K_1 и другом оборудовании генератора. Если принято значение емкости C_1 , существенно большее правой части неравенства для C_1 в (6), то сила тока i_e не будет обращаться в нуль и диоды K_2 можно не использовать.

Таблица 1

Приближенные значения параметров генератора при различных значениях энергии импульса

W_H , МДж	L_1 , Гн	L_2 , мкГн	L_H , мкГн	t_u , мс	t_i , мс	f_m , Гц	P_{mE} , МВт
5	0,4	40	0,4	13	18	3,96	19,8
10	0,8	80	0,8	25	35	1,98	
20	1,6	160	1,6	50	70	0,99	

По заданным значениям W_{L1} , I_{m1} , I_{m2} , R_H , $\lambda_H = L_H/L_2 \ll 1$, q с использованием формул (5) получены соотношения для приближенного расчета параметров генератора без учета потерь энергии:

$$n_i = \frac{I_{m2}}{I_{m1}} \approx \frac{w_1}{w_2}, \quad L_1 = \frac{2W_{L1}}{I_{m1}^2}, \quad L_2 \approx \frac{L_1}{n_i^2}, \quad L_H \approx \lambda_H L_2,$$

$$U_{mH} = R_H I_{m2}, \quad U_{m2} \approx 1,2 U_{mH}, \quad U_{m1} \approx n_i U_{m2}, \quad f_m \approx \frac{(q-1)R_H}{5q(L_2 + L_H)}, \quad t_u \approx \frac{L_2}{2R_H}, \quad (7)$$

$$t_i \approx \frac{(1 + \lambda_H)L_2 \ln 2}{R_H}, \quad P_{mH} = I_{m2}^2 R_H, \quad W_E \approx W_{L1} \approx W_H = P_{mH} t_u, \quad P_E = f W_E.$$

Здесь n_i — коэффициент трансформации тока; w_1 , w_2 — количество витков первичной и вторичной обмоток трансформатора соответственно; U_{mH} , U_{m1} , U_{m2} — максимальные значения напряжений на активном сопротивлении потребителя, первичной и вторичной обмотках трансформатора соответственно; f_m — максимально возможная частота следования импульсов тока i_2 ; $P_{mE} = P_E$ — максимальная средняя мощность внешнего источника при частоте $f = f_m$ и энергии $W_E \approx W_H$.

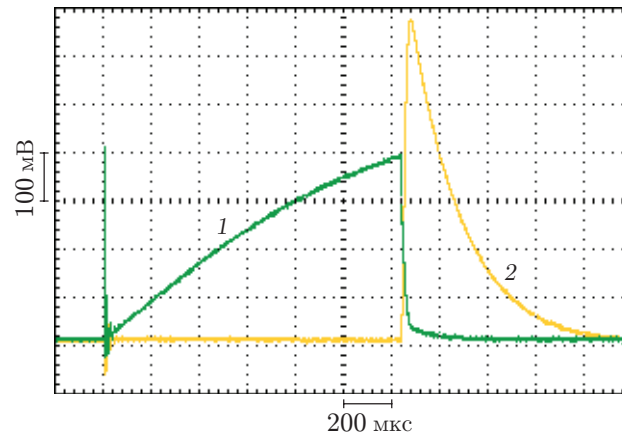
Результаты расчета и эксперимента. В табл. 1 приведены приближенные значения параметров генератора, рассчитанные по формулам (7) при $I_{m1} = 5$ кА, $I_{m2} = 500$ кА, $n_i = 100$, $R_H = 1,6$ мОм, $\lambda_H = 0,01$, $q = 2$, $U_{mH} = 800$ В, $U_{m2} = 960$ В, $U_{m1} = 96$ кВ, $P_{mH} = 400$ МВт и различных значениях энергии импульса. Уточненные расчетные параметры генератора с накапливаемой энергией 10 МДж при электропитании от электрической сети, трехфазного трансформатора ТСЗ-1600/10 ($M_{m1} = 6500$ кг) и выпрямителя имели следующие значения: $W_{L1} = 10$ МДж, $R_H = 1,6$ мОм, $L_H = 0,8$ мкГн, $L_e = 0,75$ мГн, $R_e = 10$ мОм, $C_1 = 0,45$ Ф, $R_{C1} = 0,233$ Ом, $C_2 = 102$ мкФ, $R_k = 1$ кОм, $L_1 = 0,8$ Гн, $R_1 = 1,914$ мОм, $L_2 = 74,20$ мкГн, $R_2 = 0,206$ мкОм, $M = 7,636$ мГн, $E = 831$ В, $I_{me} = 5$ кА, $I_{m1} = 5$ кА, $I_{m2} = 490,5$ кА, $U_{mC1} = 831$ В, $U_{mC2} = 98,28$ кВ, $U_{m1} = 98,28$ кВ, $U_{m2} = 841$ В, $P_{mH} = 411,6$ МВт, $W_H = 9,57$ МДж, $\eta = 0,91$, $f = 0,1$ Гц, $T = 10$ с, $t_{m1} = 5$ с, $t_k = 4,1$ мс, $t_u = 25$ мс, $t_i = 35$ мс, $P_E = 1,05$ МВт, $W_E = 10,52$ МДж, $M_{C1} = 432$ кг, $M_{C2} = 1860$ кг, $M_y = 18$ т. Для генерирования серии импульсов тока i_2 с частотой 0,1 Гц в качестве коммутатора K_1 может использоваться специальный быстродействующий выключатель постоянного тока, рассчитанный на отключение тока 5 кА при напряжении между отключающими контактами до 100 кВ. Например, при использовании масляного выключателя типа ВМТ-110Б-20/1000 выключатель постоянного тока может иметь массу $M_{K1} \leq 2260$ кг [8]. При этом воздушный трансформатор имеет две охлаждаемые до температуры, равной 20 К, пятислойные обмотки из особо чистой меди с коэффициентом связи $K_{cv} \approx 0,991$, масса трансформатора равна $M_{m2} \approx 5000$ кг. Общая масса оборудования с учетом массы трансформаторов M_{m1} , M_{m2} , диодов, выключателя M_{K1} и конденсаторов M_{C1} , M_{C2} составляет $M_y \approx 18$ т.

Согласно результатам расчетов максимальная активная мощность потребителя P_{mH} значительно превышает амплитудную мощность внешнего источника (ЭДС) $P_{Ae} =$

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные максимальные значения сил тока и напряжений при $f = 400$ Гц, $q = 2$

Метод исследования	E , В	U_{mC_1} , В	U_{mC_2} , В	U_{mK_1} , В	I_{me} , А	I_{m1} , А	I_{m2} , А
Расчет	30	41,16	202,6	181,5	0,393	0,383	0,744
Эксперимент	30	42,00	170,0	190,0	0,380	0,390	0,680

Рис. 3. Осциллограммы напряжений на сопротивлениях 1 Ом малогабаритного генератора, соответствующие силам тока i_1 (1) и i_2 (2)

$E I_{me} \approx 4,16$ МВт при достаточно высокой эффективности работы генератора η и следующих значениях удельных энергетических параметров импульса в частотно-импульсном режиме: $P_{mH}/M_y \approx 23$ кВт/кг, $W_H/M_y \approx 0,53$ кДж/кг. Максимальные значения энергии в конденсаторах C_1 , C_2 равны соответственно 158 и 493 кДж при потере энергии в резисторе R_k , составляющей 382 кДж. Данные значения энергии существенно меньше переданной потребителю энергии W_H . При этом только масса конденсаторов емкостного генератора импульсных токов, состоящего из 5000 конденсаторов типа ИК-100-0,4 с суммарной емкостью 10 МДж, составляет 160 т, что значительно больше массы оборудования M_y рассматриваемого генератора [4, 8].

Для определения эффективности работы генератора и разработки методики расчета его характеристик изготовлен малогабаритный генератор, параметры которого определяются уравнениями, аналогичными уравнениям (2). Данный генератор имеет воздушный трансформатор массой 5 кг с двумя пятислойными обмотками ($K_{cv} \approx 0,983$, $n_i = 2$). В качестве коммутатора K_1 использовался транзисторный ключ. Параметры малогабаритного генератора имеют следующие значения: $L_e = 10,4$ мГн, $R_e = 3,3$ Ом, $C_1 = 10,86$ мкФ, $C_2 = 24,4$ нФ, $R_k = 9,92$ кОм, $L_1 = 99,7$ мГн, $R_1 = 8,9$ Ом, $L_2 = 22,9$ мГн, $R_2 = 4,9$ Ом, $M = 47$ мГн, $R_H = 101$ Ом, $L_H = 0$. В табл. 2 приведены расчетные и экспериментальные максимальные значения сил тока и напряжений (U_{mK_1} — амплитуда напряжения на коммутаторе K_1).

Для малогабаритного генератора на рис. 3 приведены характерные осциллограммы напряжений на измерительных сопротивлениях 1 Ом, которые соответствуют силам тока i_1 и i_2 . Расчетные и экспериментальные максимальные значения напряжений и сил тока, приведенные в табл. 2, осциллограммы напряжений, представленные на рис. 3, и соответствующие им расчетные зависимости сил тока i_1 , i_2 от времени практически совпадают.

Заключение. Предложена конструкция и разработана методика расчета характеристик трансформаторного генератора с энергией импульса силы тока более 1 МДж. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и перспективности применения данного генератора для электропитания активно-индуктивных потребителей мощными импульсами тока при подключении его к внешнему источнику постоянного напряжения с ограниченной мощностью. Генератор способен работать как в режиме одиночных импульсов, так и в частотно-импульсном режиме. Достоверность методики расчета и эффективность работы исследуемого генератора подтверждаются результатами экспериментальных исследований с использованием малогабаритного трансформаторного генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fair H. D.** The past, present and future of electromagnetics launch technology and the IEEE International EML symposia // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41, N 5. P. 1024–1027.
2. **McNab I. R.** Large-scale pulsed power opportunities and challenges // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42, N 5. P. 1118–1127.
3. **Асиновский Э. И.** Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Э. И. Асиновский, Е. Ф. Лебедев, А. А. Леонтьев и др. М.: Наука, 2002.
4. **Носов Г. В., Носова М. Г., Васильева Ю. З., Кулешова Е. О.** Расчет и анализ электропитания рельсотрона от магнетогидродинамического генератора и трансформатора // ПМФТ. 2018. Т. 59, № 2. С. 74–81.
5. **Бут Д. А.** Накопители энергии / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. **Беляков А. И.** Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития // Электрохим. энергетика. 2006. Т. 6, № 3. С. 146–149.
7. **Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 1.** Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. **Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 2.** Электротехнические изделия и устройства / Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: Энергоатомиздат, 1986.

*Поступила в редакцию 24/VI 2019 г.,
после доработки — 7/X 2019 г.
Принята к публикации 28/X 2019 г.*
