

УДК 621.313.12

ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ

Г.В. Носов, С.В. Пустынников

Томский политехнический университет

E-mail: nosov@elti.tpu.ru

Рассмотрено применение индуктивно-емкостного генератора мощных импульсов тока для питания электрофизических установок в частотном режиме. Индуктивно-емкостный генератор состоит из питающего синхронного электромашинного генератора, работающего в кратковременно-ударном режиме, обмотка которого с переменной ЭДС и с двумя группами тиристоров используется для накопления энергии в магнитном поле первичной обмотки трансформатора. Параллельно первичной накапливающей энергию обмотке трансформатора подсоединяется конденсаторная батарея. Вторичная обмотка этого трансформатора подключается посредством третьей группы тиристоров к электрофизической установке. Приведены уравнения и результаты расчета в виде временных зависимостей и таблиц. Величина емкости батареи оптимизируется в диапазоне от одного до десяти значений резонансной емкости первичной обмотки трансформатора. Наличие конденсаторной батареи в 5...10 раз повышает мощность генератора, причем максимальная энергия в батарее до 10 раз меньше максимальной запасаемой энергии в магнитном поле первичной обмотки трансформатора. При длительной работе генератора частота следования импульсов тока в нагрузке может превышать одну десятую частоты изменения синусоидальной ЭДС электромашинного генератора.

Ключевые слова:

Генератор, импульс тока, частотный режим, электрофизическая установка, синхронный электромашинный генератор, переменная электродвижущая сила, тиристор, накопление энергии, трансформатор.

Key words:

Generator, pulse current, frequency mode, electrophysical installations, synchronous electric machine generator, a variable electromotive force, thyristors, energy storage, transformer.

В настоящее время для питания рельсотронов, лазеров, плазмотронов, ускорителей заряженных частиц и других электрофизических установок применяются источники мощных импульсов тока, такие как электромашинные генераторы, аккумуляторные батареи, емкостные и индуктивные накопители, магнитокумулятивные и магнитогидродинамические генераторы [1–5]. Импульсные источники с резистивными («теплыми») индуктивными накопителями электромагнитной энергии и с размыкающимися (взрывными) коммутаторами являются одними из наиболее мощных генераторов импульсов тока с удельной запасаемой энергией в индуктивном накопителе до 5 Дж/см³ и более. Однако взрывные коммутаторы затрудняют реализацию частотного (многократного) режима работы такого генератора и дают значительные перенапряжения [2, 3, 5]. Поэтому разработка и расчет генератора мощных импульсов тока с резистивным индуктивным накопителем для частотного режима питания электрофизических установок является актуальной задачей.

В качестве источника мощных импульсов тока для частотного питания электрофизических установок можно использовать индуктивный генератор с тиристорными коммутаторами, трансформатором и однофазным синхронным электромашинным генератором кратковременно-ударного действия для накопления энергии в первичной обмотке трансформатора [1, 6]. Однако при многих параметрах этих генераторов и их нагрузок невозможно добиться перехода токов тиристоров через нулевые значения для их запираания, а также получить приемлемую скорость нарастания тока во вторичной обмотке трансформатора, что ограничивает применение и генерируемую мощность указанных индуктив-

ных генераторов. Для расширения используемых параметров генераторов и их нагрузок, а также для увеличения генерируемой мощности был предложен индуктивно-емкостный генератор с конденсаторной батареей [7], включенной параллельно накапливающей энергию первичной обмотке трансформатора (рис. 1). Трансформатор может быть воздушным [1] или с шихтованным ферромагнитным сердечником, имеющим зазор, где в магнитном поле накапливается основная энергия генератора (рис. 2).

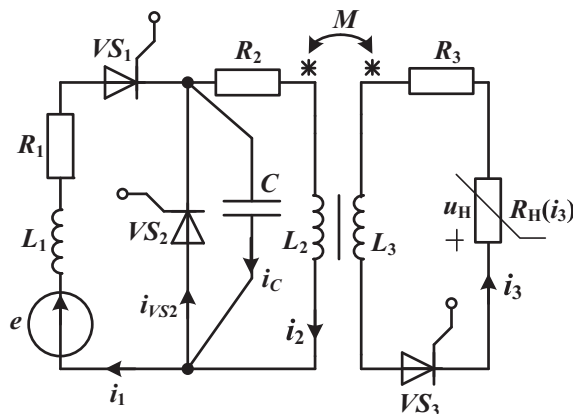


Рис. 1. Электрическая схема индуктивно-емкостного генератора: $e = E_m \sin \omega t$, L_1 , R_1 – переменная ЭДС, индуктивность и сопротивление обмотки синхронного электромашинного генератора; VS_1 , VS_2 , VS_3 – группы тиристоров; C – емкость конденсаторной батареи; L_2 , L_3 и R_2 , R_3 – индуктивности и сопротивления первичной и вторичной обмоток накапливающей энергию трансформатора; M – взаимная индуктивность обмоток трансформатора; u_H и $R_H(i_3)$ – напряжение и нелинейное сопротивление нагрузки; i_1 , i_2 , i_3 , i_{VS2} , i_3 – токи генератора

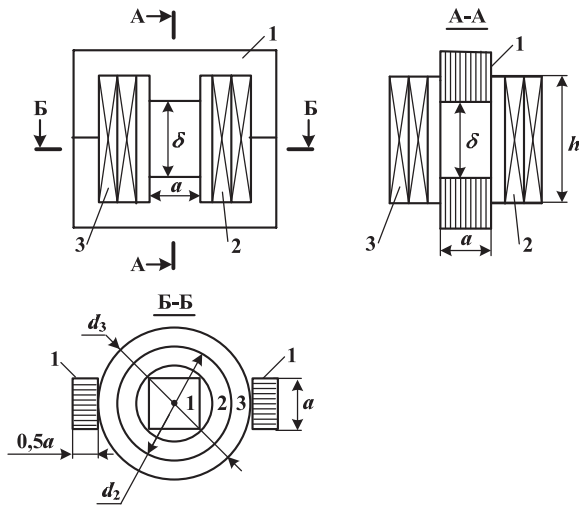


Рис. 2. Трансформатор с разъемным ферромагнитным шихтованным сердечником: 1) сердечник; 2) первичная обмотка с числом витков w_1 и индуктивностью L_1 ; 3) вторичная обмотка с числом витков w_2 и индуктивностью L_2 ; a – ширина сердечника; d_2, d_3 – внешние диаметры первичной и вторичной обмоток; h – высота обмоток; δ – воздушный зазор

При определенных параметрах генератора в момент времени $t=0$, когда ЭДС e равна нулю, управляющим импульсом включается группа тиристоров VS_1 , токи i_1, i_2 и i_c начинают изменяться: токи i_1 и i_c нарастают от нуля до первых максимальных значений и затем уменьшаются до нуля, а ток i_2 увеличивается. Напряжение на конденсаторах u_c увеличивается от нуля до первого максимального значения. При переходе тока i_1 через нулевое значение группа тиристоров VS_1 запирается. Ток конденсаторов i_c переходит через нулевое значение

и меняет направление. Напряжение на конденсаторах u_c уменьшается от первого максимального значения до нуля. Все это время ток i_2 растет до первого максимального значения.

В момент времени, когда напряжение u_c становится равным нулю и ток i_2 максимален, управляющим импульсом включается группа тиристоров VS_2 и их ток $i_{VS2}=i_2$ немного снижается за счет потерь энергии в R_2 . В момент времени $t=2\pi/\omega$ включается группа тиристоров VS_1 , и ток i_1 нарастает, а i_{VS2} уменьшается. При переходе тока i_{VS2} через нулевое значение группа тиристоров VS_2 запирается. Токи i_1 и i_c нарастают до вторых максимальных значений и затем уменьшаются до нуля, а ток i_2 увеличивается. Напряжение u_c увеличивается от нуля до второго максимального значения. При переходе тока i_1 через нулевое значение группа тиристоров VS_1 запирается. Ток конденсаторов i_c меняет направление. Напряжение u_c уменьшается от второго максимального значения до нуля. Все это время ток i_2 растет до второго максимального значения.

В момент времени $t=4\pi/\omega$ вновь включается группа тиристоров VS_1 и т. д. С каждым последующим периодом изменения ЭДС e максимальные значения тока i_2 возрастают, происходит накопление энергии в магнитном поле первичной обмотки трансформатора с индуктивностью L_2 .

В момент времени $t \approx 2n\pi/\omega$ ($n=0,5;1,5;2,5\dots$), когда группы тиристоров VS_1 и VS_2 заперты ($i_1=i_{VS2}=0$), а ток $i_2=-i_c$ максимален, управляющим импульсом включается группа тиристоров VS_3 , и ток i_3 нарастает от нуля до максимума и затем снижается до нуля. При возможном переходе тока i_3 через нулевое значение группа тиристоров VS_3 за-

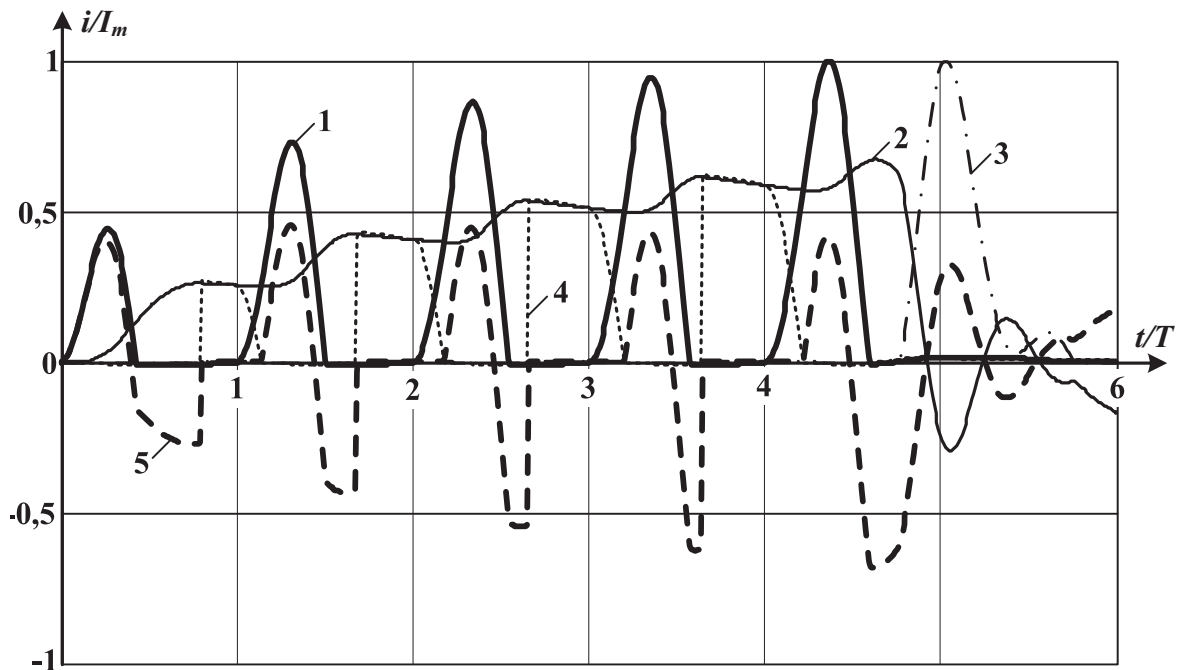


Рис. 3. Относительные временные зависимости токов (i/I_m) при максимальных значениях I_{m1} тока i_1 и I_{m3} тока i_3 : 1) i_1/I_{m1} ; 2) i_2/I_{m2} ; 3) i_3/I_{m3} ; 4) i_{VS2}/I_{m1} ; 5) i_c/I_{m1}

пирается, т. е. в нагрузке формируется импульс тока i_3 . За счет потерь энергии в R_2 , R_3 и нагрузке токи $i_2 = -i_C$ и i_3 снижаются до нулевых значений. Индуктивно-емкостный генератор готов к генерированию следующего импульса тока i_3 .

На рис. 3–5 приведены характерные расчетные зависимости при $T=2\pi/\omega$ и $n=4,5$, которые получены при помощи разработанного алгоритма вычислений в системе Mathcad [8] на основании следующих уравнений:

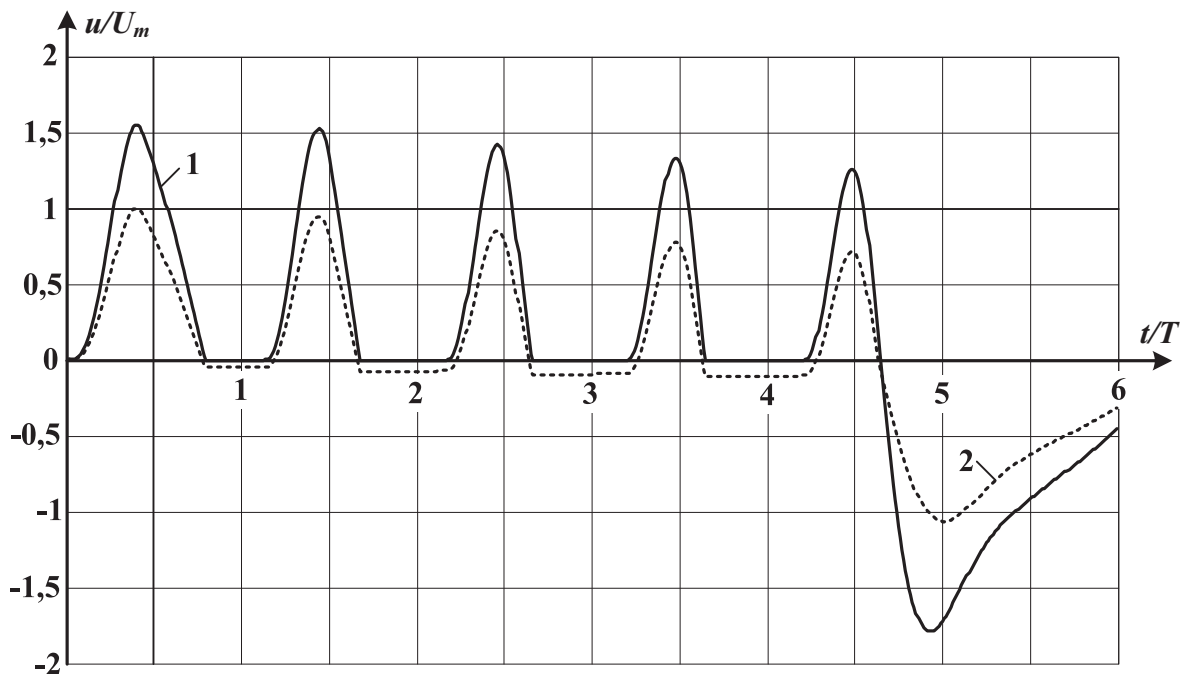


Рис. 4. Относительные временные зависимости напряжений u/U_m на зажимах обмоток трансформатора при максимальных значениях E_m ЭДС e и U_{m3} напряжения u_3 . Напряжения на обмотках: 1) первичной – u_2/E_m ; 2) вторичной – u_3/U_{m3}

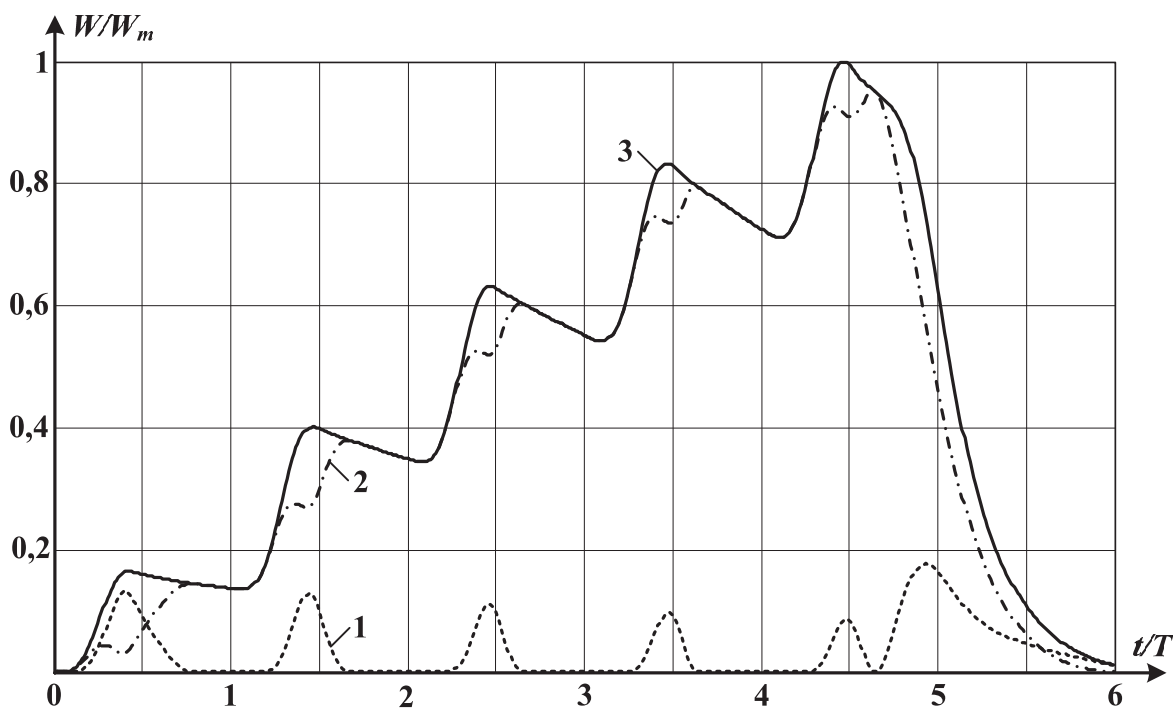


Рис. 5. Относительные временные зависимости энергий W/W_m при максимуме суммарной накапливаемой энергии W_m . Энергия: 1) в конденсаторной батарее W_C/W_m ; 2) в магнитном поле всех обмоток генератора W_L/W_m ; 3) суммарная $(W_C+W_L)/W_m$

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + (R_1 + R_{VS1})i_1 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_3}{dt} + R_2 i_2 = e;$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_3}{dt} + R_2 i_2 + R_{VS2} i_{VS2} = 0;$$

$$L_3 \frac{di_3}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + R_3 i_3 + R_{VS3} i_3 + u_H = 0;$$

$$u_C + R_{VS2} i_{VS2} = 0;$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt};$$

$$i_1 + i_{VS2} = i_2 + i_C,$$

где R_{VS1} , R_{VS2} и R_{VS3} – сопротивления тиристоры $VS1$, $VS2$ и $VS3$ в открытом и закрытом состояниях; напряжение на нелинейной активной нагрузке (α и m – постоянные параметры):

$$u_H = \alpha i_3^m. \quad (*)$$

В табл. 1, 2 приведены расчетные параметры генераторов с трансформатором (рис. 2), когда $n=4,5$ и нелинейная активная нагрузка имеет напряжение (*), причем: B – магнитная индукция в сердечнике; c_2 , c_3 и b_2 , b_3 – толщина и ширина медных шин первичной и вторичной обмоток трансформатора при толщине их изоляции 0,1 мм; M_{TP} – масса трансформатора; I_{m2} – максимум тока i_2 в первичной обмотке трансформатора; U_{mH} – максимальное напряжение на нагрузке; U_{mC} – максимальное напряжение на конденсаторах; W_e – поступившая от внешнего источника энергия в генератор; W_H – переданная за импульс энергия в нагрузку; $\eta = W_H / W_e$ – эффективность генератора; P_m – максимальная мощность нагрузки; P_e – средняя мощность, потребляемая от электромашинного генератора.

Величина емкости конденсаторной батареи, определяемая в диапазоне $\frac{1}{\omega^2 L_2} < C < \frac{10}{\omega^2 L_2}$, существенно влияет на токи, напряжения, энергию, мощность и эффективность генератора. В свою очередь параметры нагрузки совместно с емкостью C определяют ток i_3 , напряжение u_H , мощность P_m , энергию W_H и эффективность η .

Индуктивно-емкостные генераторы имеют эффективность преобразования энергии до 50 % и могут использоваться для частотного питания мощными импульсами тока электрофизических установок на автономных и промышленных объектах.

Таблица 1. Параметры повышающего ток индуктивно-емкостного генератора

B	w_2	w_3	δ	a	d_2	d_3	h	c_2	c_3	b_2	b_3	M_{TP}
Тл	–	–	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	кг
1,5	300	30	40	189	320	397	200	1	4,4	10	50	310
E_m	P_e	ω	L_1	L_2	L_3	M	R_1	R_2	R_3	C		
В	кВт	1/с	мГн	мГн	мГн	мГн	МОм	МОм	МОм	мкФ		
$380\sqrt{2}$	11	314	10	100	1	9,6	126	628	3,14	500		
m	α	I_{m1}	I_{m2}	I_{m3}	U_{mH}	U_{mC}	U_{m3}	W_e	W_m	W_H	η	P_m
–	В/А ^m	А	А	А	В	В	В	Дж	Дж	Дж	–	кВт
0	70	235	160	1708	70	841	79	2061	1332	880	0,428	120
0,5	2			1310	72					1014	0,492	95
1	$61 \cdot 10^{-3}$			1192	73					1008	0,489	87
2	$61 \cdot 10^{-6}$			1100	74					985	0,478	81
4	$62 \cdot 10^{-12}$			1048	75					952	0,462	78

Таблица 2. Параметры повышающего напряжение индуктивно-емкостного генератора

B	w_2	w_3	δ	a	d_2	d_3	h	c_2	c_3	b_2	b_3	M_{TP}
Тл	–	–	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	кг
1,5	300	3000	40	189	320	414	200	1	0,6	10	4	320
E_m	P_e	ω	L_1	L_2	L_3	M	R_1	R_2	R_3	C		
В	кВт	1/с	мГн	мГн	Гн	Гн	МОм	МОм	Ом	мкФ		
$380\sqrt{2}$	11	314	10	100	10	0,96	126	628	31,4	500		
m	α	I_{m1}	I_{m2}	I_{m3}	U_{mH}	U_{mC}	U_{m3}	W_e	W_m	W_H	η	P_m
–	В/А ^m	А	А	А	В	В	В	Дж	Дж	Дж	–	кВт
0	7000	235	160	20	7000	836	7845	2052	1319	855	0,417	141
0,5	500			22	2336					989	0,482	51
1	100			22	2159					918	0,447	47
2	10			19	3501					908	0,442	65
4	0,1			15	5043					884	0,431	76

Выводы

1. Предложен индуктивно-емкостный генератор мощных импульсов тока для питания электрофизических установок в частотном режиме, состоящий из конденсаторной батареи, однофазного синхронного электромашинного генератора и трансформатора, обмотки которых коммутируются тиристорными ключами и работают в кратковременно-ударном режиме.
2. Величина емкости конденсаторной батареи оптимизируется в диапазоне от одного до десяти значений резонансной емкости первичной обмотки накапливающей энергию трансформатора для обеспечения максимальных значений мощности и эффективности генератора, а также перехода тока ЭДС через нулевое значение.
3. Наличие конденсаторной батареи с оптимальной емкостью повышает мощность индуктивно-емкостного генератора примерно в 5...10 раз, причем максимальная энергия в батарее до 10 раз меньше максимальной запасаемой энергии в магнитном поле первичной обмотки трансформатора.
4. При длительной работе индуктивно-емкостного генератора частота следования импульсов тока в нагрузке может превышать одну десятую частоты изменения синусоидальной ЭДС электромашинного генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов Г.В., Пустынников С.В. Индуктивный генератор импульсов тока для частотного режима питания релаксатора // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 84–89.
2. Асиновский Э.И., Лебедев Е.Ф., Леонтьев А.А. и др. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2002. – 398 с.
3. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. – Л.: Наука, 1985. – 224 с.
4. Лившиц А.Л., Отто М.А. Импульсная электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.
5. Импульсные системы большой мощности / под ред. Э.И. Асиновского. – М.: Мир, 1981. – 248 с.
6. Индуктивный генератор импульсов тока: пат. на ПМ 87847. Рос. Федерация. № 2009118719/22, заявл. 18.05.09; опубл. 20.10.09, Бюл. № 29. – 4 с.: ил.
7. Индуктивно-емкостный генератор импульсов тока: пат. на ПМ 107652. Рос. Федерация. № 2011112095/08, заявл. 30.03.11; опубл. 20.08.11, Бюл. № 23. – 4 с.: ил.
8. Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2000. – 592 с.

Поступила 24.10.2011 г.