

УДК 621.313.12

ИНДУКТИВНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ТОКА ДЛЯ ЧАСТОТНОГО РЕЖИМА ПИТАНИЯ РЕЛЬСОТРОНА

Г.В. Носов, С.В. Пустынников

Томский политехнический университет

E-mail: nosov@elti.tpu.ru

Рассмотрено применение индуктивного генератора импульсов тока для частотного режима питания рельсотрона. Индуктивный генератор состоит из специального синхронного электромашинного генератора, работающего в кратковременно-ударном режиме, фазная обмотка которого с переменной ЭДС и двумя группами тиристоров используется для накопления энергии в магнитном поле первичной обмотки воздушного трансформатора. Вторичная обмотка этого повышающего ток трансформатора подключена к рельсотрону. Каждая фаза трехфазного синхронного генератора способна питать свой трансформатор и рельсотрон. Приведены уравнения и результаты расчета в виде временных зависимостей и таблиц. Эти генераторы способны с высокой эффективностью использоваться на автономных объектах и могут конкурировать с другими источниками электромагнитной энергии.

Ключевые слова:

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

Key words:

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

В настоящее время рельсотроны рассматриваются как перспективные электромагнитные ускорители тел массой 0,001...10 кг до скоростей, превышающих 1,8 км/с, которая является максимальной для продуктов сгорания пороха. Для достижения таких скоростей рельсотрон необходимо запитать от очень мощного импульсного источника электромагнитной энергии, способного генерировать импульсы тока с амплитудой более 1 МА, длительностью до 10 мс и энергией более 1 МДж [1, 2]. В качестве такого источника можно использовать емкостные и индуктивные накопители, а также электромашинные генераторы: униполярные генераторы, синхронные генераторы и генераторы с периодически изменяющейся индуктивностью [3–7].

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 [3, 5, 7]. Однако взрывные коммутаторы затрудняют реализацию частотного (многократного) режима работы генератора, дают значительные перенапряжения, и взрывная коммутация токов более 1 МА весьма проблематична. Поэтому разработка и расчет индуктивного генератора мощных импульсов тока для частотного режима питания рельсотрона является актуальной задачей.

В качестве такого генератора можно использовать индуктивный генератор с тиристорными коммутато-

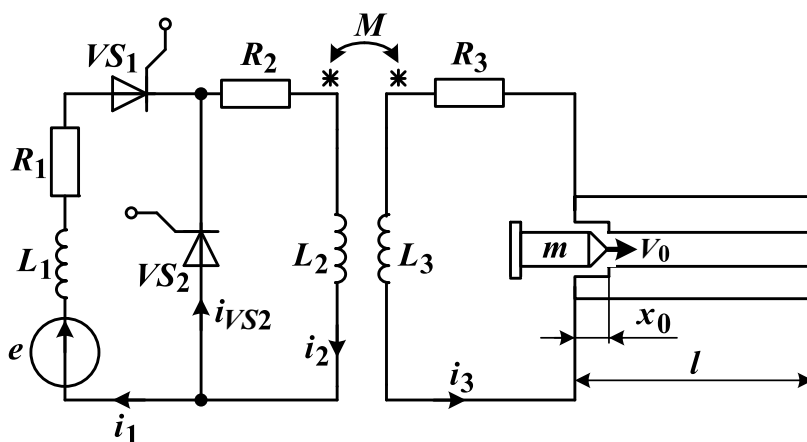


Рис. 1. Электрическая схема фазы генератора: e , L_1 , R_1 — переменная ЭДС, индуктивность и сопротивление фазной обмотки синхронного генератора; VS_1 , VS_2 — группы тиристоров; L_2 , L_3 и R_2 , R_3 — индуктивности и сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора; M — взаимная индуктивность обмоток; m , V_0 , x_0 , l — масса, начальная скорость и начальное положение ускоряемого тела, а также длина рельсотрона; i_1 , i_2 , i_{VS2} , i_3 — токи генератора

рами, трансформатором и с используемым для зарядки первичной обмотки трансформатора специальным синхронным электромашинным генератором кратковременно-ударного действия [6, 8]. Синхронный генератор может быть однофазным для питания одного рельсотрона (рис. 1) или трехфазным для одновременного питания трех рельсотронов, а повышающий ток трансформатор выполняется воздушным и однофазным с числом витков первичной обмотки w_1 , существенно превышающим число витков вторичной обмотки w_2 , т. е. $w_1 \gg w_2$ (рис. 2).

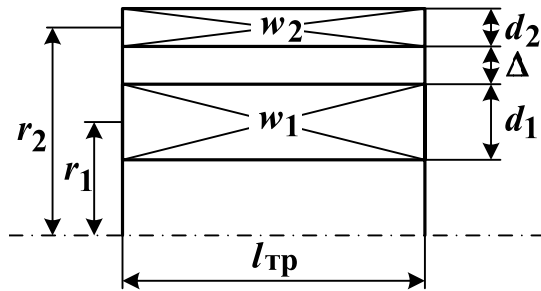


Рис. 2. Воздушный трансформатор с цилиндрическими обмотками: $l_{тр}$ – длина обмоток; r_1 и r_2 – средние радиусы первичной и вторичной обмоток; d_1 и d_2 – толщины первичной и вторичной обмоток; Δ – толщина изоляции между обмотками

Индуктивный генератор импульсов тока работает следующим образом. Внешним приводным двигателем (турбина, дизель, газопоршневой механизм, электрический двигатель) ротор синхронного генератора раскручивается до номинального числа оборотов. Обмотка ротора подключается к ис-

точнику постоянного напряжения, создается постоянный магнитный поток возбуждения, который вращается вместе с ротором и наводит в неподвижной фазной обмотке статора переменную ЭДС (рис. 1):

$$e = E_m \sin \omega t.$$

В момент времени $t=0$, когда ЭДС равна нулю, управляющим импульсом включается группа тиристоров VS_1 , токи $i_1=i_2$ начинают нарастать от нуля до первого максимального значения i_{m1} , когда $t=\pi/\omega$. В этот момент времени управляющим импульсом включается группа тиристоров VS_2 , при уменьшении тока i_1 начинает нарастать от нуля ток i_{VS2} . Как только наступает равенство токов $i_{VS2}=i_2$, ток i_1 переходит через нулевое значение, и группа тиристоров VS_1 запирается. Далее при токе $i_1=0$ токи $i_{VS2}=i_2$ уменьшаются с постоянной времени первичной обмотки трансформатора $\tau_2=L_2/R_2$. В момент времени $t=2\pi/\omega$, когда ЭДС равна нулю, управляющим импульсом снова включается группа тиристоров VS_1 , и ток i_1 начинает нарастать от нуля до i_2 . В результате ток i_{VS2} уменьшается, и при переходе тока i_{VS2} через нулевое значение группа тиристоров VS_2 запирается. Затем токи $i_1=i_2$ нарастают до второго максимального значения i_{m2} , когда $t=3\pi/\omega$. В этот момент времени управляющим импульсом включается группа тиристоров VS_2 ; при уменьшении тока i_1 начинает нарастать от нуля ток i_{VS2} и т. д.

В момент времени $t=(2n_1\pi)/\omega$ ($n_1=0,5;1,5;2,5\dots$), когда токи $i_1=i_2$ максимальны и ток $i_{VS2}=0$ (группа тиристоров VS_2 заперта), проводящее ток ускоримое

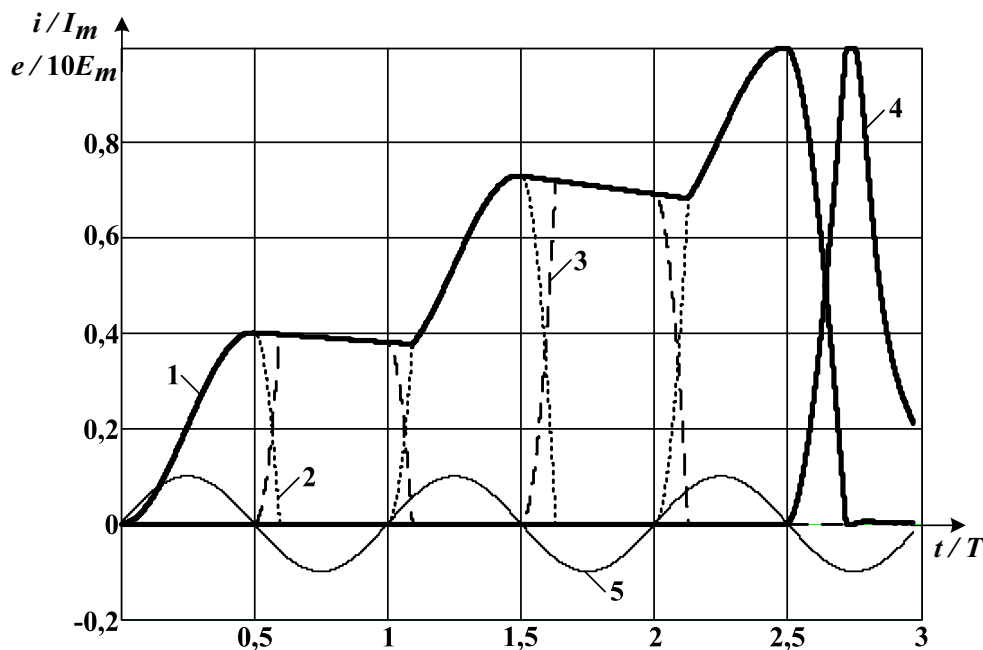


Рис. 3. Относительные временные зависимости токов (i/I_m) и ЭДС ($e/10E_m$) при максимальных значениях I_{m2} тока i_2 и I_{m3} тока i_3 : 1) i_2/I_{m2} ; 2) i_1/I_{m2} ; 3) i_{VS2}/I_{m2} ; 4) i_3/I_{m3} ; 5) $e/10E_m$

тело с некоторой начальной скоростью V_0 подается в рельсотрон. Остановленное в начальном положении $x_0 \ll l$ (рис. 1) своими выступами тело замыкает цепь вторичной обмотки трансформатора. При уменьшении токов $i_1=i_2$ ток i_3 нарастает от нуля до максимального значения. В момент времени $t \approx 2(n_1+0,25)\pi/\omega$, когда ток i_3 максимален, токи

$i_1=i_2$ переходят через нулевое значение, и группа тиристоров VS_1 запирается. При максимуме тока i_3 давление магнитного поля на ускоряемое тело максимально, выступы тела срезаются, тело приходит в движение и ускоряется за время $t=(2n_2\pi)/\omega$. Ток i_3 и запасенная в магнитном поле трансформатора энергия уменьшаются практически до нуля.

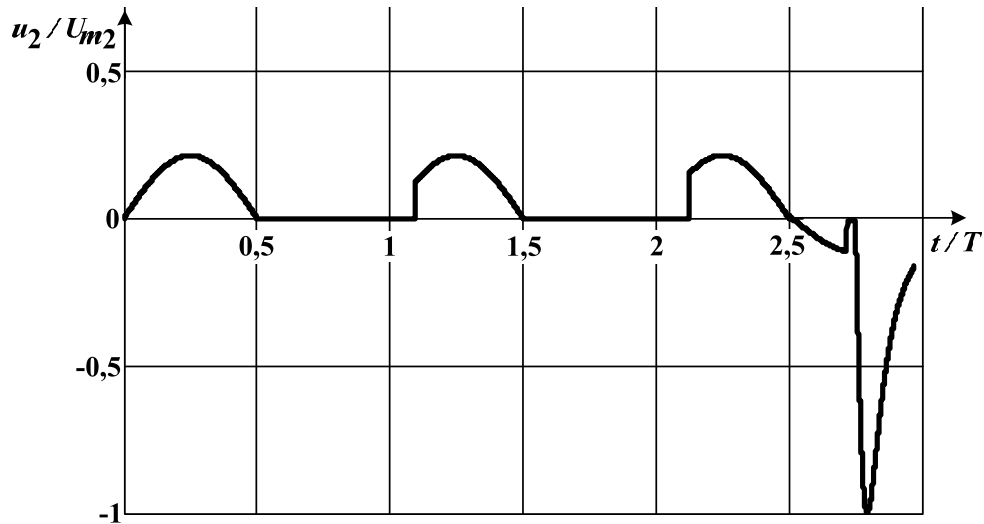


Рис. 4. Относительная временная зависимость напряжения u_2/U_{m2} на зажимах первичной обмотки трансформатора при максимальном по модулю значении U_{m2}

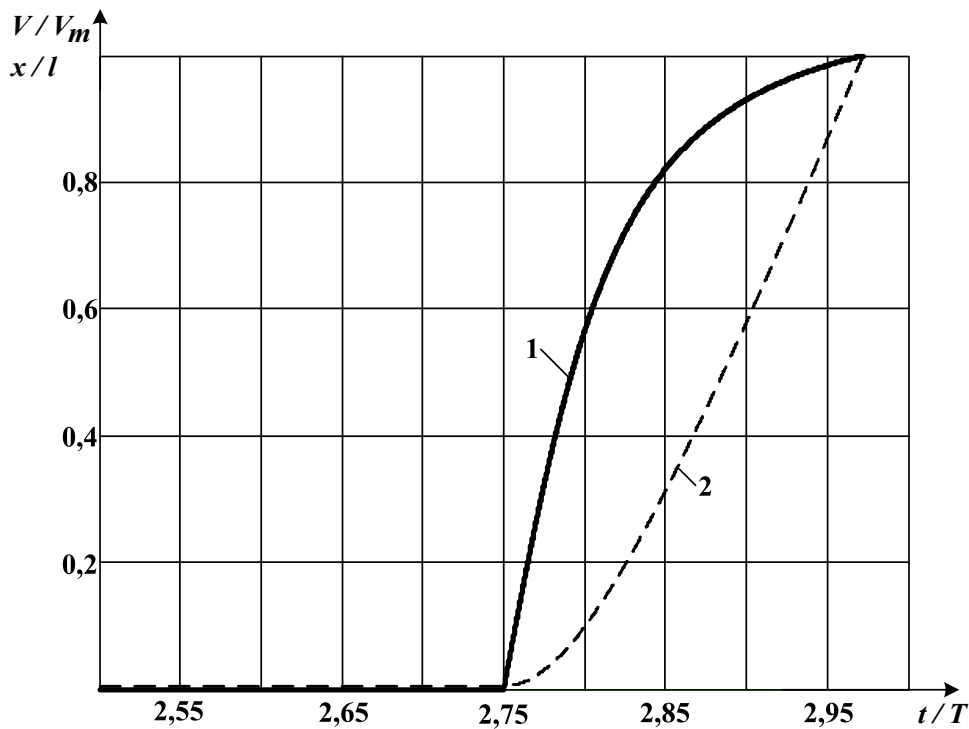


Рис. 5. Относительные временные зависимости: 1) скорость тела V/V_m при максимальном значении V_m ; 2) пройденный телом путь в рельсотроне x/l

После вылета тела из рельсотрона, восстановления числа оборотов ротора и магнитного потока возбуждения, а также после охлаждения тириستоров и обмоток генератор вновь готов к работе. Каждая фаза трехфазного генератора способна питать свой трансформатор и рельсотрон со сдвигом во времени $2\pi/3\omega$.

На рис. 3–5 приведены характерные расчетные относительные зависимости при периоде сигнала $T=2\pi/\omega$; $n_1=2,5$; $n_2=0,472$, полученные при помощи разработанного алгоритма вычислений в системе Mathcad [9]. Использовалось уравнение для определения ЭДС и следующие соотношения:

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

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_3}{dt} + R_2 i_2 + R_{VS2}(i_2 - i_1) = 0;$$

$$(L_3 + L_0 x) \frac{di_3}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + (R_3 + R_0 x + L_0 V)i_3 = 0;$$

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{L_0}{2} i_3^2;$$

$$V = \frac{dx}{dt},$$

где R_{VS1} и R_{VS2} – электрические сопротивления тириستоров $VS1$ и $VS2$ в открытом и закрытом состояниях; L_0 и R_0 – индуктивность (Гн/м) и сопротивление (Ом/м) рельсотрона; V и x – скорость (м/с) ускоряемого тела и путь (м), пройденный этим телом в рельсотроне.

В табл. 1–3 приведен пример результатов расчета питания рельсотрона (рис. 6) с шинами из облагороженной и закаленной бериллиевой бронзы [2, 10] при $n_1=2,5$ и $n_2=0,472$.

Таблица 1. Параметры фазы синхронного электромашинного генератора ($\omega=314$ 1/с)

Амплитуда ЭДС	E_m	В	9810
Индуктивность обмотки	L_1	мкГн	94,43
Сопротивление обмотки	R_1	мОм	0,49
Максимальное значение тока i_1	I_{m1}	кА	145,8
Время работы	$t_p=2\pi(n_1+0,25)/\omega$	мс	55
Интеграл для выбора числа тиристоров VS_1	$\int_0^{t_p} i_1^2 dt$	А ² с	$2,67 \cdot 10^8$
Максимальное значение тока i_{VS2}	I_{mVS2}	кА	105,1
Интеграл для выбора числа тиристоров VS_2	$\int_0^{t_p} i_{VS2}^2 dt$	А ² с	$1,29 \cdot 10^8$
Максимум напряжения (по модулю)	U_{m1}	кВ	42
Генерируемая энергия	$We = \int_0^{t_p} (ei_1) dt$	МДж	11,27
Средняя генерируемая мощность	$P_e = We/t_p$	МВт	204,8
Максимальная мощность	P_{m1}	МВт	1090
Габаритная мощность 3-х фаз	P	МВт	100
Кинетическая энергия ротора	W_k	МДж	640
Масса трехфазного генератора (в габаритах генератора ТИ-100-2 [6])	$M_{ГГ}$	т	252
Мощность приводного двигателя	$P_{ДВ}$	МВт	8
Масса двигателя	$M_{ДВ}$	т	15

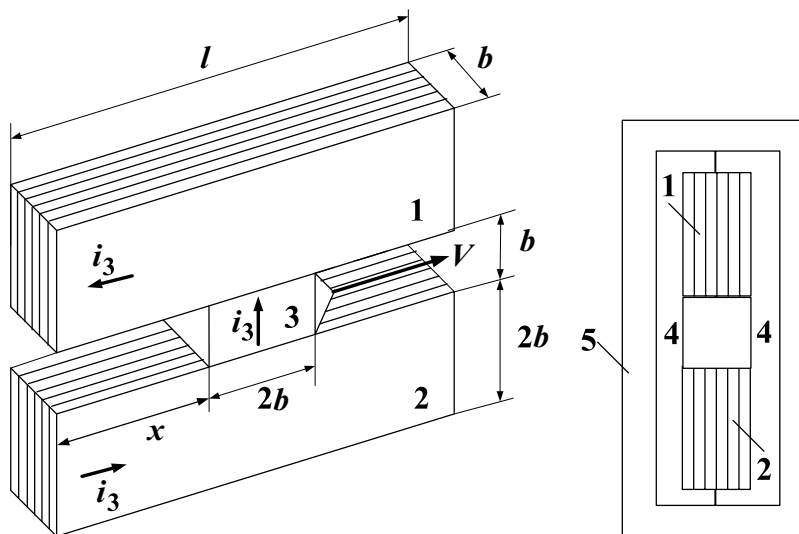


Рис. 6. Рельсотрон: 1 и 2) шины из изолированных проводящих ток пластин; 3) ускоряемое тело; 4) изоляция; 5) крепеж; b – ширина шин

Таблица 2. Параметры однофазного воздушного трансформатора

Число витков первичной обмотки	w_1	–	50
Число витков вторичной обмотки	w_2	–	2
Длина трансформатора	$l_{\text{тр}}$	м	2
Средний радиус первичной обмотки	r_1	м	0,5
Средний радиус вторичной обмотки	r_2	м	0,539
Толщина первичной обмотки	d_1	см	1,8
Толщина вторичной обмотки	d_2	см	4
Толщина изоляции между обмотками	Δ	см	1
Площадь сечения провода первичной обмотки	s_1	мм ²	640,8
Площадь сечения провода вторичной обмотки	s_2	мм ²	40000
Запасаемая в магнитном поле энергия	W	МДж	10
Масса меди обмоток	M_M	т	3,3
Объем трансформатора	$V_{\text{тр}}$	м ³	1,963
Удельная запасаемая энергия	$W/V_{\text{тр}}$	Дж/см ³	5,111
Индуктивность первичной обмотки	L_2	мГн	0,944
Сопrotивление первичной обмотки	R_2	мОм	4,9
Добротность первичной обмотки	$\omega L_2/R_2$	–	60,5
Индуктивность вторичной обмотки	L_3	мкГн	1,72
Сопrotивление вторичной обмотки	R_3	мкОм	3,39
Добротность вторичной обмотки	$\omega L_3/R_3$	–	159,4
Взаимная индуктивность обмоток	M	мкГн	38,67
Коэффициент связи между обмотками	$K_{\text{св}}$	–	0,96
Максимум тока первичной обмотки i_2	I_{m2}	кА	145,8
Максимум тока вторичной обмотки i_3	I_{m3}	МА	3,2
Максимум напряжения (по модулю) первичной обмотки	U_{m2}	кВ	42
Максимум напряжения вторичной обмотки	U_{m3}	кВ	1,86

С учетом найденных значений токов и напряжений группы тиристоров VS_1 и VS_2 можно набрать, например, из тиристоров ТБ273-2000 24 класса, рассчитанных на ударный ток 40 кА при длительности импульса 10 мс, интеграл $8 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$ и обратное напряжение 2400 В: в группе VS_1 – в 34 параллельных ветвях 18 последовательно соединенных тиристоров, т. е. всего 612 тиристоров; в группе VS_2 – в 17 параллельных ветвях 18 последовательно соединенных тиристоров, т. е. всего 306 тиристоров. Развитие полупроводниковой техники позволит снизить количество тиристоров, повысит их надежность и сделает применение рассмотренных генераторов более привлекательным.

Для выбранной мощности приводного двигателя (8 МВт) с учетом нагрева шин рельсотрона трехфазная установка способна производить через 5 с каждым из трех рельсотронов по 12 выстрелов в минуту (всего 36 выстрелов в минуту) с последующей паузой в течение нескольких минут для восстановления магнитного потока возбуждения синхронного генератора, охлаждения его обмоток и обмоток трансформаторов.

сформаторов, охлаждения тиристоров и шин рельсотронов. При этом альтернативный генератор с емкостным накопителем энергии 10 МДж из 3704 импульсных конденсаторов ИК-6-150 [11] имел бы массу только конденсаторов не менее 167 т.

Таблица 3. Параметры рельсотрона

Длина рельсотрона	l	м	10
Ширина шин из бериллиевой бронзы	b	мм	60
Удельная проводимость бронзы при 20 °С	$\gamma_{\text{БР}}$	1/Ом·м	$14,7 \cdot 10^6$
Объемная плотность бронзы при 20 °С	$\rho_{\text{БР}}$	кг/м ³	8230
Предел прочности бронзы при растяжении	$\sigma_{\text{БР}}$	МПа	1100
Начальное положение ускоряемого тела	x_0	мм	50
Индуктивность	L_0	мкГн/м	0,588
Сопrotивление	R_0	мкОм/м	19,71
Максимальная потребляемая мощность	P_m	МВт	4912
Максимальное давление магнитного поля	σ_m	МПа	854
Повышение температуры шин за один импульс	θ_m	°С	14
Объемная плотность ускоряемого тела	ρ	кг/м ³	3000
Масса ускоряемого тела	m	кг	1,46
Максимальная скорость	V_m	км/с	3,012
Кинетическая энергия ускоряемого тела	W_m	МДж	6,62
Эффективность преобразования энергии	W_m/We	–	0,587
Общая масса трехфазной установки из двигателя, синхронного генератора, трех трансформаторов и трех рельсотронов	$M_{\text{ус}}$	т	300

Выводы

1. Рассмотрено применение индуктивного генератора для питания рельсотронов в частотном режиме. Показано, что такие генераторы могут с высокой эффективностью использоваться на автономных объектах и конкурировать с другими источниками электромагнитной энергии.
2. В генераторе на начальном участке работы ускоряемым телом реализован режим короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора, что обеспечивает эффективную передачу энергии между обмотками.
3. Для перехода тока синхронного генератора через нулевое значение после подключения рельсотрона оптимизированы параметры трансформатора и время накачки первичной обмотки трансформатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Witt W., Löffler M. The electromagnetic Gun-CCloser to Weapon System Status // Military Technology. — 1998. — № 5. — Р. 80–86.
2. Носов Г.В. К расчету параметров и эффективности преобразования энергии рельсотроном // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 310. — № 2. — С. 70–73.
3. Носов Г.В. Расчет импульсных источников тока с индуктивными накопителями энергии // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 4. — С. 72–76.
4. Носов Г.В. Генерирование мощных импульсов тока электромагнитными источниками с изменяющейся индуктивностью // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 68–70.
5. Асиновский Э.И., Лебедев Е.Ф., Леонтьев А.А. и др. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. В.Е. Фортва. — М.: Наука, 2002. — 398 с.
6. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. — Л.: Наука, 1985. — 224 с.
7. Импульсные системы большой мощности / под ред. Э.И. Асиновского. — М.: Мир, 1981. — 248 с.
8. 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.
9. Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2000. — 592 с.
10. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 488 с.
11. Лившиц А.Л., Отто М.А. Импульсная электротехника. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 352 с.

Поступила 02.09.2010 г.

УДК 621.311.016.361

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДАЛЬНИХ ЛЭП С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

В.И. Готман, А.В. Глазачев

Томский политехнический университет
E-mail: mo@elti.tpu.ru

Рассматриваются закономерности регулирования напряжения и реактивной мощности дальних электропередач сверхвысокого напряжения с промежуточными системами по условию обеспечения минимальных потерь. Указан диапазон нагрузок, в пределах которых возможен режим согласованного регулирования напряжения, обеспечивающий максимальный КПД электропередачи. Исследуется влияние потерь при коронировании на зоны согласованного регулирования напряжения.

Ключевые слова:

Дальние электропередачи, промежуточные системы, согласованное регулирование напряжения, натуральная мощность, коронирование, компенсирующие устройства.

Key words:

Long-distance power line, intermediate system, coordinated voltage control, line natural load, corona effect, compensating units.

Введение

Несмотря на большое число глубоких и обширных работ по регулированию напряжения и реактивной мощности дальних линий электропередач (ДЛЭП) сверхвысокого напряжения, думается, что особенности, которые накладывают промежуточные системы (ПС), не позволяют считать эти вопросы исчерпанными. Не освещались ранее также вопросы, связанные с учетом коронирования проводов и его влияния на распределение напряжения и целесообразность применения глубокого регулирования напряжения в электропередачах сверхвысокого напряжения. Разработанное в последние годы новое поколение управляемых шунтирующих реакторов, статических тиристорных компенсаторов и конденсаторных батарей существенно расширяет возможности их применения для реализации согласованного регулирования напряжения

и реактивной мощности в указанных электропередачах.

В связи с чрезмерной загрузкой высоковольтных ДЛЭП собственной реактивной мощностью и связанной с этим резкой неравномерностью распределения напряжения и тока целесообразно при помощи поперечных компенсирующих устройств (КУ) делить линию на участки. Компенсирующие устройства позволяют исключить переток реактивной мощности с одного участка на другой и проводить автономное регулирование реактивной мощности каждого участка.

Промежуточные системы в силу объективных условий в общем случае делят электропередачу на неравные участки с независимым характером изменения их активных мощностей. Эти особенности предопределяют более сложный закон регулирования напряжения и характер его распределе-