

лаждения в стали с повышенным содержанием углерода будут образовываться более неравновесные структуры, с высоким уровнем дефектности и остаточных дальнедействующих напряжений. Аустенит в такой стали обладает повышенной прочностью, поэтому необходимы более высокие степени обжатия при горячей обработке давлением.

Вся совокупность перечисленных обстоятельств привела к недостаточной степени деформации при обработке давлением, что в [1] было зафиксировано путем анализа изломов. В свою очередь, недостаточная степень деформации при горячей ковке обусловила образование большого количества пор и

микротрещин, а относительно высокая температура — выход на границы примесей внедрения с образованием вторичных фаз в виде тонких прослоек. Установленное в [1] снижение пластичности материала бракованной поковки относительно требований по ТУ является прямым следствием неоптимальной структуры как на макрокопическом, так и на микрокопическом уровне. Положение усугубилось, по-видимому, тем, что содержание серы в бракованном металле оказалось на верхнем уровне допустимого по марочному составу. Однако при штатном содержании углерода это обстоятельство не привело бы к критическим последствиям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апасов А.М., Валуев Д.В., Данилов В.И. О возможных причинах брака крупнотоннажных заготовок из низкоуглеродистой марганцевой стали на ПО «Юрмаш» // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 310. — № 3. — С. 90–92.
2. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Тихомирова Л.Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. — Новосибирск: Наука, 1993. — 280 с.
3. Любимова Л.Л. Методика рентгенометрического анализа внутрискруктурных напряжений // Известия Томского политехнического университета. — 2003. — Т. 306. — № 4. — С. 72–77.
4. Малинина Р.И., Малютин Е.С., Новиков В.Ю. и др. Практическая металлография. — М.: Интермет Инжиниринг, 2004. — 230 с.
5. Структурно-фазовые состояния металлических систем / Под ред. А.И. Потекаева. — Томск: Изд-во НТЛ, 2004. — 356 с.
6. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. Т. II. Основы термической обработки / Под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. — М.: Металлургия, 1995. — 336 с.
7. Сорокин В.Г., Гервасьев М.А., Палеев В.С. и др. Стали и сплавы. Марочник. — М.: Интермет Инжиниринг, 2001. — 608 с.

Поступила 22.12.2006 г.

УДК 621.313.12

## РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА С ИНДУКТИВНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

Г.В. Носов

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

*Получены формулы для расчета эффективности и параметров импульсных источников тока при зарядке и разрядке индуктивного накопителя энергии на активную нагрузку. Для зарядки индуктивного накопителя рассмотрены аккумуляторные и конденсаторные батареи, униполярные и синхронные с выпрямителем электромашинные генераторы, у которых схему замещения можно представить последовательным соединением эквивалентной емкости, индуктивности и сопротивления. Получены формулы для расчета параметров индуктивного накопителя в виде многослойной катушки, при которых достигается высокая эффективность зарядки. Показано, что наиболее эффективны импульсные источники тока при колебательной зарядке индуктивного накопителя, когда более 50 % энергии генератора может быть передано нагрузке.*

В настоящее время импульсные источники с резистивными («теплыми») индуктивными накопителями электромагнитной энергии  $W$  и с размыкающимися (взрывными) коммутаторами  $K_2$  (рис. 1) являются одними из наиболее мощных генераторов импульсов тока с удельной запасаемой энергией в индуктивном накопителе до 5 Дж/г и более [1–3]. Поэтому расчет эффективности и параметров таких источников является актуальной задачей.

Для зарядки индуктивных накопителей энергией  $W$  рассмотрим такие генераторы электромагнитной энергии как заряженные от внешнего источника аккумуляторные и конденсаторные батареи, а

также униполярные и синхронные с выпрямителем электромашинные генераторы в режиме электродинамического торможения [1–3].

Схему замещения этих генераторов можно приближенно представить в виде последовательного соединения электрической емкости  $C_g$ , индуктивности  $L_g$  и сопротивления  $r_g$  [2, 3], тогда для эквивалентных параметров цепи зарядки индуктивного накопителя

$$C_g = \frac{2W_g}{U_g^2}; \quad r_z = r_g + r; \quad L_e = L_g + L, \quad (1)$$

когда коммутаторы  $K_1$  и  $K_2$  замкнуты, определяем корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{r_z}{2L_e} \pm \sqrt{\frac{r_z^2}{4L_e^2} - \frac{1}{L_e C_g}} \quad (2)$$

и время зарядки индуктивного накопителя ( $p_1 \neq p_2$ )

$$t_z = \frac{\ln(p_2 / p_1)}{p_1 - p_2}, \quad (3)$$

соответствующее максимальному значению тока  $i(t)$

$$I_m = i(t_z) = \frac{C_g U_g p_1 p_2}{p_1 - p_2} [e^{p_1 t_z} - e^{p_2 t_z}] \quad (4)$$

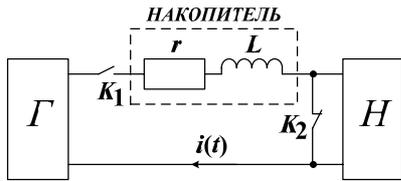
и максимальной запасенной накопителем энергии

$$W = \frac{L I_m^2}{2} \quad (5)$$

при значении напряжения на емкости  $C_g$

$$U_z = u_C(t_z) = \frac{U_g p_2}{p_1 - p_2} \left[ e^{p_1 t_z} - \frac{p_1}{p_2} e^{p_2 t_z} \right], \quad (6)$$

где  $W_g$  и  $U_g$  – начальные значения соответственно запасенной энергии и напряжения генератора при разомкнутом коммутаторе  $K_1$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема зарядки индуктивного накопителя и импульсного питания нагрузки: Г – генератор электромагнитной энергии; Н – нагрузка;  $K_1$  и  $K_2$  – коммутаторы;  $L$  и  $r$  – индуктивность и сопротивление провода накопителя

Для всех типов генераторов на интервале времени зарядки индуктивного накопителя  $0 < t < t_z$  ток  $i(t)$  можно принять равным

$$i(t) = \frac{I_m (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})}{e^{p_1 t_z} - e^{p_2 t_z}} \approx I_m \left[ \sin \left( \frac{\pi t}{2 t_z} \right) \right]^q, \quad (7)$$

где  $q \approx 0,5$  при аperiодической зарядке, когда корни  $p_{1,2}$  вещественные, отрицательные и разные;  $q \approx 1$  при колебательной зарядке, когда корни  $p_{1,2}$  комплексные и сопряженные.

Если учесть тепловые потери энергии в индуктивном накопителе и генераторе

$$W_T = r_z \int_0^{t_z} i(t)^2 dt = I^2 r_z t_z, \quad (8)$$

где  $I$  – действующее (среднеквадратичное) значение тока на интервале времени  $0 < t < t_z$ , то при суммарной запасенной энергии в магнитном поле генератора и накопителя

$$W_M = \frac{L_e I_m^2}{2} \quad (9)$$

эффективность накопления (зарядки) энергии в магнитном поле с учетом (1, 7–9) определим как

$$\eta_z = \frac{W_M}{W_M + W_T} = \frac{1}{1 + \frac{2 t_z}{\tau_z} \left( \frac{I}{I_m} \right)^2} \approx \frac{1}{1 + \frac{2 t_z (1 + r_g / r)}{\tau (1 + L_g / L) (1 + q^{2/3})}}, \quad (10)$$

где  $\tau_z = L_e / r_z$  и  $\tau = L / r$  – постоянные зарядки и накопителя соответственно.

При зарядке с учетом (10) средняя мощность генератора будет равна

$$P_z = \frac{W_T + W_M}{t_z} = \frac{W_M}{t_z \eta_z}. \quad (11)$$

Далее, если предположить, что коммутатор  $K_2$  размыкается в момент времени  $t = t_z$  мгновенно быстро и нагрузка  $H$  (рис. 1) характеризуется постоянным сопротивлением  $r_H$ , то при эквивалентном сопротивлении цепи разрядки генератора и накопителя

$$r_p = r_z + r_H, \quad (12)$$

можно определить корни характеристического уравнения

$$p_{3,4} = -\frac{r_p}{2L_e} \pm \sqrt{\frac{r_p^2}{4L_e^2} - \frac{1}{L_e C_g}} \quad (13)$$

и ток при начальных условиях  $i(t_z) = I_m$  и  $u_C(t_z) = U_z$ :

$$i(t) = \frac{p_3 I_m}{p_3 - p_4} \left[ \left( 1 - \frac{C_g p_4 U_z}{I_m} \right) e^{p_3 (t - t_z)} + \left( \frac{p_4}{p_3} - \frac{C_g p_4 U_z}{I_m} \right) e^{p_4 (t - t_z)} \right]. \quad (14)$$

В результате при максимальных значениях напряжения

$$U_m = r_H I_m \quad (15)$$

и мощности нагрузки

$$P_m = I_m^2 r_H \quad (16)$$

из условия преобразования всей энергии магнитного поля в тепло после размыкания коммутатора  $K_2$

$$I_m^2 r_p t_p = \frac{L_e I_m^2}{2}$$

находим расчетную длительность разрядки генератора и накопителя на нагрузку

$$t_p = \frac{\tau_p}{2} \quad (17)$$

и определяем эффективность передачи энергии генератора нагрузке

$$\eta = \frac{W_M}{W_g}, \quad (18)$$

где  $\tau_p = L_e / r_p$  – постоянная разрядки.

Коэффициент усиления мощности за счет сжатия импульса тока ( $t_p < t_z$ ) с учетом (10) составит

$$K_p = \frac{P_m}{P_z} = 2 \frac{r_H}{r_z} \eta_z \frac{t_z}{\tau_z}, \quad (19)$$

причем этот коэффициент возрастает по мере увеличения сопротивления нагрузки  $r_H$ .

По формулам (1–19) при изменении эквивалентной индуктивности  $L_e$  были проведены расчеты и построены графики (рис. 2), из которых следует, что наиболее эффективна работа импульсных источников при колебательной зарядке, когда  $L_e$  много меньше критической индуктивности ( $\lambda = L_e/L_{kp} \ll 1$ )

$$L_{kp} = \frac{4\tau_z^2}{C_g}, \quad (20)$$

т. е. индуктивности, обеспечивающей одинаковые корни (2). Однако с уменьшением  $L_e$  снижается по сравнению с  $\tau_z$  время зарядки  $t_z$ , что приводит к возрастанию средней мощности генератора  $P_z$ .

Таким образом, для обеспечения высоких эффективностей  $\eta_z$  и  $\eta$  при меньшей средней мощности генератора  $P_z$  необходимо иметь  $L_e \ll L_{kp}$  при максимальной постоянной зарядки  $\tau_z$ .

Так как

$$\tau_z = \tau \frac{1 + L_g/L}{1 + r_g/r},$$

то, очевидно, и постоянная накопителя  $\tau$  должна быть также максимальна.

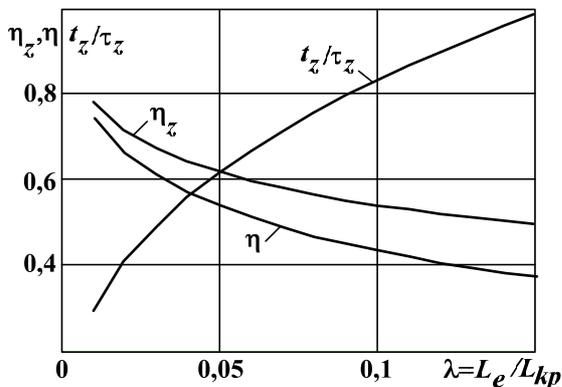


Рис. 2. Расчетные зависимости эффективностей  $\eta_z$ ,  $\eta$  и относительного времени зарядки  $t_z/\tau_z$

Определим параметры индуктивного накопителя, при которых постоянная  $\tau$  максимальна. Будем считать, что индуктивный накопитель выполнен в виде многослойной катушки прямоугольного сечения (рис. 3), индуктивность которой рассчитывается по приближенной формуле [4]:

$$L \approx \frac{0,32 \cdot 10^{-4} R^2 w^2}{6R + 9l + 10a}, \quad (21)$$

причем, если слагаемые в знаменателе одного порядка, то погрешность расчета не превышает 1 %.

Обозначим через некоторый коэффициент  $k > 0$

длину катушки  $l = ka$ , тогда сопротивление катушки составит

$$r = \frac{2\pi R w^2}{\gamma K_z k a^2}, \quad (22)$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость материала проводника;  $K_z$  – коэффициент заполнения проводником сечения обмотки.

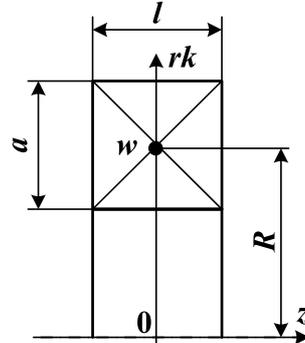


Рис. 3. Катушка прямоугольного сечения:  $w$  – число витков;  $R$  – средний радиус витков;  $a$  – толщина обмотки;  $l$  – длина катушки;  $z$  и  $rk$  – оси координат

В результате с учетом (21) и (22) записываем постоянную накопителя

$$\tau = \frac{L}{r} \approx \frac{0,16 \cdot 10^{-4} \gamma K_z k R a^2}{\pi [6R + (9k + 10)a]}, \quad (23)$$

откуда

$$R \approx \frac{\pi (9k + 10) a \tau}{0,16 \cdot 10^{-4} \gamma K_z k a^2 - 6\pi \tau}. \quad (24)$$

Так как внутренний радиус обмотки  $R_1 = R - 0,5a \geq 0$ , то  $R/a \geq 0,5$ , тогда на основании (24) получаем

$$\tau \approx \frac{0,08 \cdot 10^{-4} \gamma K_z k a^2}{\pi [9k + 13]} n, \quad (25)$$

где  $n \geq 1$  – некоторый коэффициент.

В свою очередь запишем максимальное значение тока как

$$I_m = \frac{K_z a l}{w} j_m, \quad (26)$$

где  $j_m$  – максимальная плотность тока в проводнике обмотки.

Подстановка в (5) формул (21), (24–26) позволяет получить соотношение для расчета толщины обмотки

$$a \approx 12 \left[ \frac{(9k + 13)(9k + 13 - 3n)W}{(K_z j_m k n)^2 (9k + 10)} \right]^{0,2}. \quad (27)$$

При помощи формул (21), (23), (5) и (26) определяем объем обмотки

$$V = 2\pi R a l = \frac{2\gamma W}{K_z j_m^2 \tau} \quad (28)$$

и массу проводника с удельной объемной плотностью  $\rho$

$$m = \rho K_Z V = \frac{2\gamma\rho W}{j_m^2 \tau}. \quad (29)$$

Далее с учетом (29) находим удельную запасаемую энергию

$$pw = \frac{W}{m} = \frac{j_m^2}{2\gamma\rho} \tau \quad (30)$$

и удельную постоянную накопителя

$$p\tau = \frac{\tau}{m} = \frac{j_m^2}{2\gamma\rho W} \tau^2. \quad (31)$$

Очевидно, что максимальным удельным параметрам (30) и (31) соответствует максимум постоянной (25), которую с учетом (27) запишем так

$$\tau \approx 3,67 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\gamma K_Z^{0,2} W^{0,4}}{j_m^{0,8}} f(k, n), \quad (32)$$

где

$$f(k, n) = \left[ \frac{kn(9k+13-3n)^2}{(9k+13)^3(9k+10)^2} \right]^{0,2}. \quad (33)$$

Расчетная функция катушки (33), которая показана на рис. 4, имеет максимальное значение, примерно равное 0,169 при  $k \approx 1$  и  $n \approx 2,5$ .

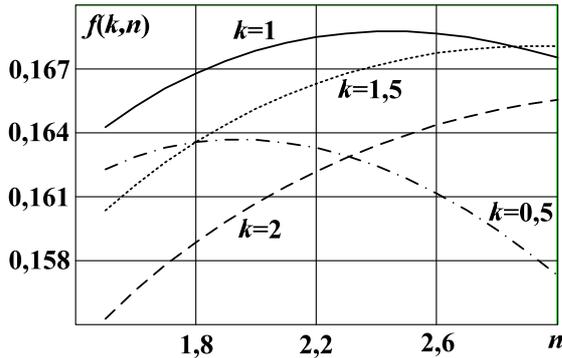


Рис. 4. Расчетная функция катушки

В результате из формул (26–28, 32) при  $f(k, n) \approx 0,169$  окончательно получаем толщину обмотки, равную длине катушки

$$a = l \approx 14,622 \frac{W^{0,2}}{K_Z^{0,4} j_m^{0,4}}, \quad (34)$$

средний радиус витков обмотки

$$R \approx 1,643a \quad (35)$$

и максимальную постоянную накопителя

$$\tau \approx 0,62 \cdot 10^{-4} \frac{\gamma K_Z^{0,2} W^{0,4}}{j_m^{0,8}}, \quad (36)$$

а из формул (21, 22) находим индуктивность

$$L \approx 0,03 \cdot 10^{-4} a w^2 \quad (37)$$

и сопротивление катушки

$$r \approx 10,312 \frac{w^2}{\gamma K_Z a}. \quad (38)$$

Следует отметить, что полученные соотношения размеров катушки  $a=l$  и  $R \approx 1,643a$  согласуются с результатами, приведенными в [5], где также указывается, что у катушек с такими размерами постоянная  $\tau$  существенно больше, чем у тороидов.

Если величины  $I_m$  и  $W$  заданы, то из (5) можно рассчитать  $L$ , а затем, используя формулы (34, 37), определить число витков катушки, подбирая такую плотность тока  $j_m$ , чтобы это число получилось целым:

$$w \approx 150,986 \sqrt{L} \frac{K_Z^{0,2} j_m^{0,2}}{W^{0,1}}. \quad (39)$$

Максимальная температура проводника обмотки катушки будет определяться зарядкой и в момент времени  $t=t_c$  при адиабатном нагреве и постоянной удельной проводимости  $\gamma$  составит

$$\theta_m \approx \theta_0 + \frac{j_m^2 t_c}{(1+q^{2/3}) C_p \rho \gamma}, \quad (40)$$

где  $\theta_0$  – начальная температура;  $C_p$  – удельная теплоемкость материала проводника.

На основании расчета магнитного поля катушки (рис. 3) получены приближенные формулы для определения максимального значения индукции

$$B_m \approx \frac{L I_m}{\sqrt{3} \pi w a^2} \quad (41)$$

и давления магнитного поля на внутренние витки катушки

$$\sigma_m \approx \frac{B_m I_m}{a}. \quad (42)$$

При заданных параметрах  $U_g, L_g, r_g$  генератора и  $W, j_m, K_Z, \gamma$  накопителя для колебательной зарядки, когда  $0,02 < \lambda < 0,15$ , из формул (2–4, 34, 38, 39) при эквивалентной емкости генератора

$$C_g = 4 \frac{\tau^2 \lambda (1+L_g/L)}{L (1+r_g/r)^2} \quad (43)$$

получены приближенные соотношения для расчета максимального значения тока

$$I_m \approx \frac{\lambda U_g}{2(\lambda^{0,6} - 0,01) r_g} + \sqrt{\frac{\lambda^2 U_g^2}{4(\lambda^{0,6} - 0,01)^2 r_g^2} - \frac{3,22 \cdot 10^4 j_m^{0,8} W^{0,6}}{\gamma K_Z^{0,2} r_g}} \quad (44)$$

и запасенной энергии генератора

$$W_g \approx 4W(1+L_g/L) \frac{(\lambda^{0,6} - 0,01)^2}{\lambda}. \quad (45)$$

Так, если величины  $W=1$  МДж;  $K_Z=0,5$ ;  $\gamma=58$  МСм/м;  $\rho=8900$  кг/м<sup>3</sup>;  $C_p=385,5$  Дж/кг·°С;  $\theta_0=20$  °С;  $r_g=1,1$  мОм;  $\lambda=0,1132$  заданы и используется генератор с  $U_g=250$  В,  $r_g=0,1$  мОм и  $L_g=0,1$  мкГн, то при  $j_m=145$  А/мм<sup>2</sup> по формулам (1–45) можно рассчитать параметры импульсного источника:  $I_m=1$  МА;  $L=2$  мкГн;  $a=l \approx 0,166$  м;  $R \approx 0,273$  м;  $w=2$  витка;  $r \approx 8,57$  мкОм;  $\tau \approx 233$  мс;

$\tau_z \approx 19$  мс;  $\tau_p \approx 1,76$  мс;  $t_z = 17$  мс;  $t_p = 0,88$  мс;  $\theta_m \approx 20,9^\circ$  C;  $B_m = 6,64$  Тл;  $\sigma_m = 39,9$  МПа;  $V \approx 0,047$  м<sup>3</sup>;  $m \approx 211$  кг;  $\rho w \approx 4,7$  Дж/г;  $p\tau \approx 1,1$  мс/кг;  $C_g = 80,7$  Ф;  $W_M = 1,05$  МДж;  $W_g = 2,52$  МДж;  $\eta_z \approx 0,512$ ;  $\eta \approx 0,417$ ;  $P_z \approx 121$  МВт;  $P_m \approx 1086$  МВт;  $K_p \approx 9$ ;  $U_m = 1086$  В. Для источника с указанными параметрами на рис. 5 приведен характерный, рассчитанный по формулам (7) и (14), график нормированного импульса тока, а на рис. 6 показаны зависимости для его максимального значения, полученные по соотношению (44).

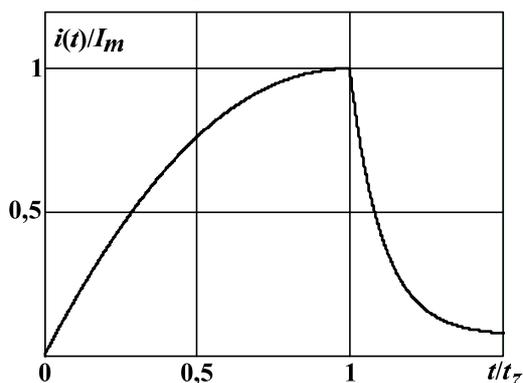


Рис. 5. Расчетный нормированный импульс тока источника

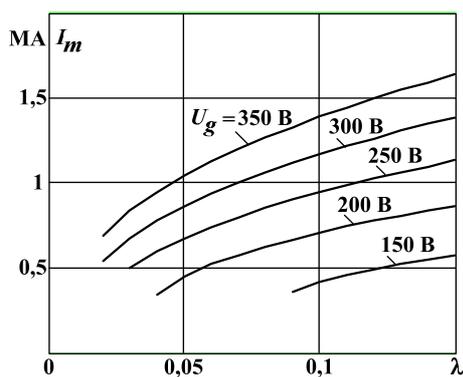


Рис. 6. Максимальные значения импульса тока

Таким образом, выведенные формулы могут использоваться для расчета параметров импульсных источников тока с индуктивными накопителями энергии. На основании анализа формул и проведенных расчетов можно сформулировать следующие выводы.

1. Наиболее эффективна колебательная зарядка, когда эквивалентная индуктивность много меньше критической индуктивности ( $\lambda \ll 1$ ) и более 50 % энергии генератора может быть передано нагрузке.
2. Для обеспечения высокой эффективности источника при меньшей средней мощности генератора необходимо иметь максимальные постоянные зарядки  $\tau_z$  и накопителя  $\tau$ .
3. С увеличением начального напряжения генератора  $U_g$  при неизменных параметрах  $W, j_m, \gamma, K_Z$  и  $r_g$  возрастают эффективности зарядки  $\eta_z$  и передачи энергии генератора нагрузке  $\eta$ , т. к. ток достигает требуемого максимального значения  $I_m$  при меньших величинах  $\lambda$ .
4. Применение в качестве генераторов аккумуляторных батарей, униполярных и синхронных генераторов для аperiodической зарядки индуктивного накопителя малоэффективно в виду низких значений  $\eta_z$  и  $\eta$ , а использование этих генераторов при колебательной зарядке требует реализации специальных конструктивных решений, направленных на увеличение скорости нарастания тока, т. е. на увеличение напряжения  $U_g$  и уменьшение индуктивности  $L_g$  и сопротивления  $r_g$ .
5. Колебательная зарядка индуктивного накопителя от конденсаторной батареи наиболее эффективна и целесообразна, особенно если батарея имеет высокую плотность запасаемой энергии  $W_g$ , которая может превышать 3 Дж/г [6].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Э.И. Асиновский, Е.Ф. Лебедев, А.А. Леонтьев и др.; Под ред. В.Е. Форгова. – М.: Наука, 2002. – 398 с.
2. Импульсные системы большой мощности / Под ред. Э.И. Асиновского. – М.: Мир, 1981. – 248 с.
3. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. – Л.: Наука, 1985. – 224 с.

4. 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.
5. Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П. Велихова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
6. Aviation week and space technology. – 1990. – V. 132. – № 19. – P. 88–89.

Поступила 25.09.2007 г.