УДК 621.313.12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОТРОНОВ. Ч. 3. РАСЧЕТ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКАХ

Г.В. Носов, А.А. Лусс

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

Получены формулы для расчета параметров рельсотронов при периодических несинусоидальных токах. Определены такие параметры, как средняя действующая магнитная индукция импульса тока в пространстве между шинами рельсотрона, эквивалентные индуктивность и сопротивление, средняя температура шин при их адиабатном нагреве, а также среднее механическое напряжение в шинах. С увеличением скважности импульсов тока при постоянном среднем повышении температуры шин повышаются амплитуда тока, механическое напряжение в шинах, максимальная скорость тела при уменьшении числа импульсов тока и частоты их следования. Для изготовления шин рельсотрона возможно применение вместо бериллиевой бронзы менее прочной, но более дешевой и технологичной хромовой бронзы, обладающей существенно большей удельной проводимостью, что повышает эффективность преобразования энергии рельсотроном.

Ключевые слова:
Рельсотрон, шина, параметр, периодический несинусоидальный ток, индукция, эквивалентная индуктивность, эквивалентное сопротивление, механическое напряжение, адиабатный нагрев шин, повышение температуры.

Для рельсотрона может быть предусмотрен режим поочередного ускорения N одинаковых тел с интервалом времени T. В этом режиме N одинаковых импульсов тока с интервалом следования T можно приближенно представить как периодический несинусоидальный ток и записать его в виде ряда Фурье [1]

$$i(t) \approx I_0 + \sum_{k=1,2..}^{\infty} \sqrt{2} I_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \qquad (1)$$

с действующим (среднеквадратичным) значением

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i(t)^2 dt} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1,2..}^{\infty} I_k^2}, \qquad (2)$$

где I_0 и I_k – постоянная составляющая и действующие значения k-гармоник тока; $\omega=2\pi/T=2\pi f$ – угловая частота первой гармоники тока при $k=1$.

Будем полагать, что для синусоидального тока с тем же действующим значением I при постоянной удельной проводимости γ материала шин известны для различных угловых частот $k\omega$ сопротивления $R_0(k\omega)$ и индуктивности $L_0(k\omega)$ рельсотрона [2, 3]. В результате с учетом (1, 2) и [1] средняя за период T активная мощность тепловых потерь в шинах рельсотрона составит (Вт/м):

$$P_0 = I^2 R_{0Э} = I_0^2 R_0(0) + \sum_{k=1,2..}^{\infty} I_k^2 R_0(k\omega), \qquad (3)$$

где $R_{0Э}$ и $R_0(0)$ – соответственно эквивалентное сопротивление и сопротивление постоянному току ($k\omega=0$) шин рельсотрона (Ом/м).

Таким образом, на основании (2, 3) находим эквивалентное сопротивление рельсотрона при заданном несинусоидальном токе (1):

$$R_{0Э} = \frac{I_0^2 R_0(0) + \sum_{k=1,2..}^{\infty} I_k^2 R_0(k\omega)}{I_0^2 + \sum_{k=1,2..}^{\infty} I_k^2}. \qquad (4)$$

Далее запишем с учетом (1) потокосцепление рельсотрона (Вб/м)

$$\psi(t) \approx I_0 L_0(0) + \sum_{k=1,2..}^{\infty} \sqrt{2} I_k L_0(k\omega) \sin(k\omega t + \varphi_k) \qquad (5)$$

и его действующее значение

$$\Psi = \sqrt{I_0^2 L_0(0)^2 + \sum_{k=1,2..}^{\infty} I_k^2 L_0(k\omega)^2}, \qquad (6)$$

где $L_0(0)$ – индуктивность рельсотрона при постоянном токе ($k\omega=0$).

В результате эквивалентную индуктивность рельсотрона при токе (1) с учетом (2) и (6) определим так (Гн/м):

$$L_{0Э} = \frac{\Psi}{I} = \frac{\sqrt{I_0^2 L_0(0)^2 + \sum_{k=1,2..}^{\infty} I_k^2 L_0(k\omega)^2}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1,2..}^{\infty} I_k^2}}. \qquad (7)$$

При постоянной удельной проводимости материала шин

$$\gamma \approx \frac{\gamma_0}{1 + \alpha_R \vartheta_{ср}}, \qquad (8)$$

усредненной действующей плотности тока $\delta_0=I/bc$ и адиабатном нагреве среднее повышение температуры шин над начальной температурой θ_0 за время NT ($N=1,2...$) составит [2]

$$\vartheta_{ср} = \frac{1}{NT}\int_0^{NT} \frac{\exp(\chi_0 t) - 1}{\alpha_R} \cdot dt = \frac{\exp(\chi_0 NT) - \chi_0 NT - 1}{\alpha_R \chi_0 NT}, \qquad (9)$$

где $\chi_0 = \dfrac{\alpha_R \delta_0^2}{\gamma_0 C_0 \rho_0}$ – температурно-временной параметр (1/с).

На рис. 1 приведены рассчитанные по формуле (9) зависимости среднего повышения температуры шин $\vartheta_{ср}$ от параметра NT для рельсотронов с шинами из бериллиевой бронзы БрБ2 [2] при δ_0=300 А/мм^2 и с шинами при δ_0=600 А/мм^2 из хромовой бронзы БрХ0,5 [4]: θ_0=20 °С; $\gamma_0\approx 50\cdot 10^6$ 1/Ом·м; $\alpha_R\approx$0,0035 1/°С; $C_0\approx$385,5 Дж/°С·кг; ρ_0=8900 кг/м^3.

Ускоряющую тело механическую силу найдем с использованием (1, 7) как производную энергии магнитного поля по расстоянию $l(t)$, характеризующее положение тела в рельсотроне [2]:

$$F(t)\approx\frac{L_{0Э}i(t)^2}{2}=w(t), \qquad (10)$$

где удельная энергия магнитного поля рельсотрона (Дж/м)

$$w(t)=\frac{L_{0Э}i(t)^2}{2}=W_0+\sum_{k=1,2...}^{\infty}\sqrt{2}W_k\sin(k\omega t+\varphi_k), \qquad (11)$$

причем действующее значение этой энергии (11) равно

$$W=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T w(t)^2dt}=\sqrt{W_0^2+\sum_{k=1,2..}^{\infty}W_k^2}, \qquad (12)$$

где W_0 и W_k – постоянная составляющая и действующее значение k-гармоники удельной энергии.

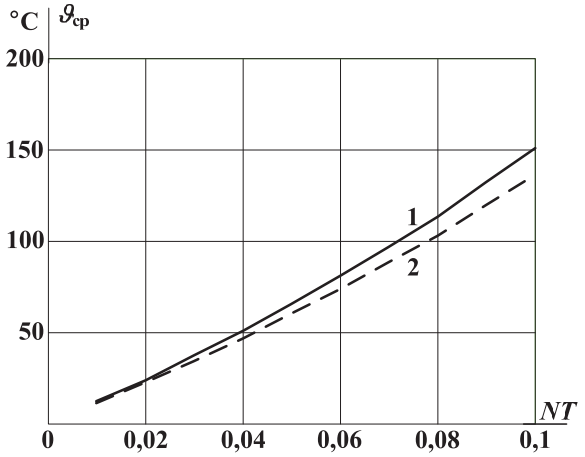

Рис. 1. *Графики зависимости среднего повышения температуры шин $\vartheta_{ср}$ от параметра NT для рельсотронов: 1) с шинами из бериллиевой бронзы при δ_0=300 А/мм^2; 2) с шинами из хромовой бронзы при δ_0=600 А/мм^2*

На основании равенства силы (10) и силы по второму закону Ньютона [5] на интервале времени $0<t<T$ уравнение движения тела массой $m_т$ в рельсотроне без учета трения и сопротивления воздуха при скорости тела

$$v(t)=\frac{dl(t)}{dt}=$$

$$=C_1+C_2t+\sum_{k=1,2...}^{\infty}\sqrt{2}V_k\sin(k\omega t+\varphi_k-0,5\pi) \qquad (13)$$

будет следующим:

$$w(t)=m_т\frac{dv(t)}{dt}=$$

$$=C_2m_т+\sum_{k=1,2...}^{\infty}\sqrt{2}m_тV_k k\omega\sin(k\omega t+\varphi_k). \qquad (14)$$

Из равенства (11) и (14) определяем коэффициенты:

$$C_2=\frac{W_0}{m_т};\ V_k=\frac{W_k}{k\omega m_т};$$

$$C_1=V_н-\sum_{k=1,2..}^{\infty}\sqrt{2}V_k\sin(\varphi_k-0,5\pi), \qquad (15)$$

где $V_н$ – начальная скорость тела при t=0.

С учетом (13) запишем расстояние, характеризующее положение тела в рельсотроне:

$$l(t)=C_3+C_1t+0,5C_2t^2+$$

$$+\sum_{k=1,2...}^{\infty}\sqrt{2}l_k\sin(k\omega t+\varphi_k-\pi), \qquad (16)$$

тогда

$$l_k=\frac{V_k}{k\omega};\ C_3=l_н-\sum_{k=1,2..}^{\infty}\sqrt{2}l_k\sin(\varphi_k-\pi), \qquad (17)$$

где $l_н$ – начальное положение тела в рельсотроне при t=0.

При этом на входе рельсотрона имеем электрическое напряжение $u(t)$ и электромагнитную мощность $P(t)$

$$u(t)=R_{0Э}l(t)i(t)+\frac{d[L_{0Э}l(t)i(t)]}{dt};\ P(t)=u(t)i(t)$$

или после преобразований с учетом (4, 7, 11) получаем

$$u(t)=[R_{0Э}l(t)+L_{0Э}v(t)]i(t)+L_{0Э}l(t)\frac{di(t)}{dt}; \qquad (18)$$

$$P(t)=2[R_{0Э}l(t)/L_{0Э}+v(t)]w(t)+p(t)l(t), \qquad (19)$$

где удельная мощность магнитного поля рельсотрона (Вт/м)

$$p(t)=\frac{dw(t)}{dt}=\sum_{k=1,2...}^{\infty}\sqrt{2}W_k k\omega\sin(k\omega t+\varphi_k+0,5\pi). \qquad (20)$$

Представим периодический несинусоидальный ток (1) в виде серии однополярных импульсов, имеющих длительность τ и скважность $q=T/\tau\geq 1$ (рис. 2, 3):

$$i(t)=\begin{cases}I_m\left[\sin\left(\dfrac{\pi t}{\tau}\right)\right]^n \text{ при } 0<t<\tau;\\ 0 \text{ при } \tau<t<T=q\tau,\end{cases} \qquad (21)$$

где I_m и $n\geq 0$ – амплитуда и степень импульса.

Ток (21) будет иметь действующее значение

$$I=I_m\sqrt{\frac{1}{q\tau}\int_0^{\tau}\left[\sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right)\right]^{2n}dt}=\frac{I_и}{\sqrt{q}} \qquad (22)$$

и длительность импульсов на половине их амплитуды (рис. 3)

$$t_0 = \tau - \frac{2\tau}{\pi}\arcsin[0,5^{1/n}], \qquad (23)$$

где $I_и$ – действующее значение импульса тока при скважности q=1.

На рис. 4 приведены относительные зависимости, полученные по (22) и (23).

Постоянные составляющие, действующие значения и начальные фазы тока (1) и удельной энергии (11) могут быть найдены по известным формулам расчета ряда Фурье [1]. Так, при n=0 ток (18) имеет

$$I_0 = \frac{I_m}{q};\ I_k = \frac{\sqrt{2}I_m}{k\pi}\left|\sin(k\pi/q)\right|;\ I = \frac{I_m}{\sqrt{q}};$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg}\left[\frac{\sin(2k\pi/q)}{1-\cos(2k\pi/q)}\right], \qquad (24)$$

тогда для удельной энергии (11) при её максимальном значении

$$W_m = \frac{L_{0Э}I_m^2}{2} \qquad (25)$$

получаем

$$W_0 = \frac{W_m}{q};\ W_k = \frac{\sqrt{2}W_m}{k\pi}\left|\sin\left(\frac{k\pi}{q}\right)\right|;$$

$$W = \frac{W_m}{\sqrt{q}};\ \varphi_k = \varphi_k. \qquad (26)$$

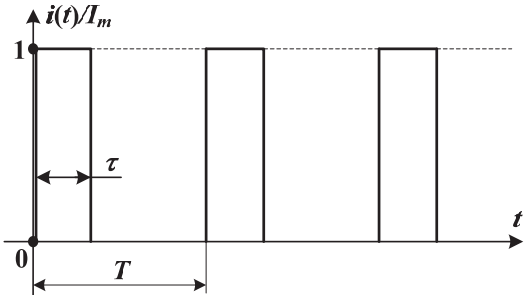

Рис. 2. *Относительные периодические однополярные импульсы тока при n=0*

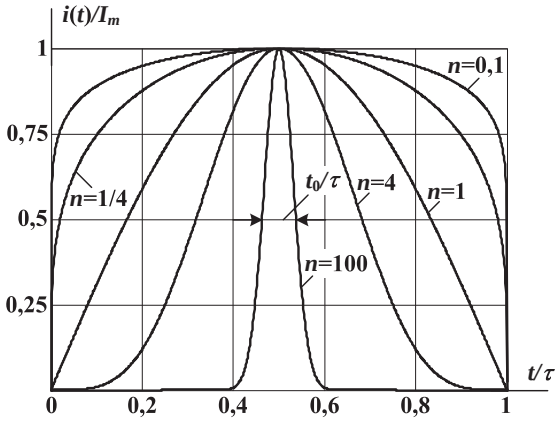

Рис. 3. *Относительные однополярные импульсы тока при разных степенях импульса n: t_0/τ – относительная длительность импульса на половине амплитуды I_m при n=100*

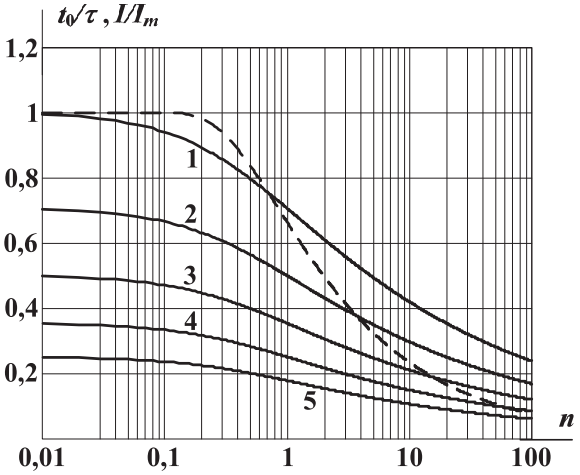

Рис. 4. *Зависимости относительной длительности импульса t_0/τ (---) и относительного действующего значения I/I_m (—) от степени n при скважностях: 1) q=1; 2) q=2; 3) q=4; 4) q=8; 5) q=16*

В свою очередь при n=1 для тока (21) найдем

$$I_0 = \frac{2I_m}{\pi q};\ I_k = \frac{2\sqrt{2}qI_m\left|\cos(k\pi/q)\right|}{\pi\left|4k^2-q^2\right|};\ I = \frac{I_m}{\sqrt{2q}}; \qquad (27)$$

$$\varphi_k = (\pi)+\operatorname{arctg}\left[\frac{1+\cos(2k\pi/q)}{\sin(2k\pi/q)}\right], \qquad (28)$$

причем π в (28) прибавляется к арктангенсу при выполнении условия:

$$\frac{\sin(2k\pi/q)}{q^2-4k^2} < 0. \qquad (29)$$

При n=1 для (11) с учетом (25) запишем

$$W_0 = \frac{W_m}{2q};\ W_k = \frac{q^2W_m}{\sqrt{2}k\pi}\frac{\left|\sin(k\pi/q)\right|}{\left|k^2-q^2\right|};\ W = \sqrt{\frac{3}{8q}}W_m; \qquad (30)$$

$$\varphi_k = (\pi) + \operatorname{arctg}\left[\frac{\sin(2k\pi/q)}{1-\cos(2k\pi/q)}\right], \qquad (31)$$

причем π в (31) прибавляется к арктангенсу при выполнении условия:

$$\frac{1-\cos(2k\pi/q)}{q^2-k^2} < 0. \qquad (32)$$

Механическая прочность шин может быть приближенно оценена по средней напряженности $\sigma_{ср}$, определяемой по σ_{xm} (незначительный поверхностный эффект) и $\sigma_{x\max}$ (сильный поверхностный эффект, когда $\Delta_0 << b, c$), где используются $I=I_и$ и B_1 – действующее значение импульса тока (22) при скважности q=1 и соответствующая этому току средняя индукция в пространстве между шинами рельсотрона [2, 3]:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_и}{2(b+c+2a)} + \frac{\mu_0 I_и}{4(b+c)} + \frac{\mu_0 I_и}{4(b+c+1,75a)}; \qquad (33)$$

$$\sigma_{xm} \approx \frac{B_1 I_и}{2(1+\beta)c};\ \sigma_{x\max} \approx \frac{B_1 I_и}{2c}; \qquad (34)$$

$$\sigma_{\text{ср}} = (\sigma_{xm} + \sigma_{x\max})/2 \le \sigma_{\text{доп}}. \quad (35)$$

В табл. 1, 2 приведены результаты расчета параметров рельсотронов с шинами из бериллиевой ($\sigma_{\text{доп}}$≈1350 МПа) и хромовой ($\sigma_{\text{доп}}$≈550 МПа) бронз [4], проведенные по формулам (1)–(35) и [2, 3] при токе (21), n=1; θ_0=20 °С; $l_{\text{н}}$=0; $V_{\text{н}}$=0; где указаны: $f_{\text{и}}$=1/T – частота следования импульсов; $l_{\text{р}}$, V_m – длина рельсотрона и максимальная скорость тела массой $m_{\text{т}}$; U_m, P_m – максимальные значения напряжения по модулю и мощности на входе рельсотрона соответственно; P_τ, P_T – средние мощности на входе рельсотрона за времена τ и T соответственно; $W_{\text{п}}$, $W_{\text{т}}$ – потребляемая рельсотроном за один импульс энергия и максимальная энергия ускоряемого тела соответственно; η=$W_{\text{т}}/W_{\text{п}}$ – эффективность преобразования энергии рельсотроном (без учета потерь энергии в источнике питания, токоподводящих шинах, в электрическом контакте ускоряемого тела и шин рельсотрона).

На рис. 5 приведены рассчитанные по формулам (13)–(20) характерные относительные временные зависимости напряжения $u(t)/U_m$ и электромагнитной мощности $P(t)/P_m$ на входе рельсотрона, скорости тела $v(t)/V_m$ и его положения в рельсотроне $l(t)/l_{\text{р}}$, причем отрицательные значения мощности $P(t)$ соответствуют возврату энергии магнитного поля рельсотрона во внешнюю цепь (источник питания).

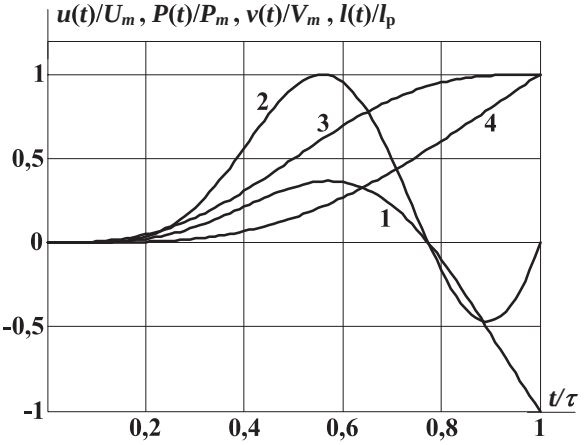

Рис. 5. *Характерные относительные временные зависимости: 1) напряжение $u(t)/U_m$; 2) мощность $P(t)/P_m$; 3) скорость тела $v(t)/V_m$; 4) положение тела в рельсотроне $l(t)/l_{\text{р}}$*

Таблица 1. *Параметры рельсотрона с шинами из бериллиевой бронзы*

a	c	b	β	δ_0	I	$\vartheta_{\text{ср}}$	γ	f	L_0	R_0
мм	мм	мм	–	А/мм^2	МА	°С	1/Ом	Гц	мкГн/м	мкОм/м
50	70	100	0,603	300	2,1	150	8,2·10^6	0	0,521	34,84
								5	0,518	35,14
								50	0,497	51,78
								500	0,401	173,72
								5000	0,354	545,60
q	N	τ	T	$f_{\text{и}}$	$I_{\text{и}}$	B_1	W_m	$\sigma_{\text{ср}}$	$L_{0\text{э}}$	$R_{0\text{э}}$
–	–	мс	мс	Гц	МА	Тл	МДж/м	МПа	мкГн/м	мкОм/м
8	12	1	8	125	5,94	32,05	17,69	1100	0,444	128,12
$m_{\text{т}}$	$l_{\text{р}}$	V_m	I_m	U_m	P_m	P_τ	P_T	$W_{\text{п}}$	$W_{\text{т}}$	η
кг	м	км/с	МА	кВ	МВт	МВт	МВт	МДж	МДж	–
2,611	1,5	3	8,40	17,57	53000	13150	1644	13,15	11,75	0,894
1,305	3	6		35,14	106000	26300	3288	26,30	23,50	
0,870	4,5	9		52,71	159100	39450	4931	39,45	35,25	

Таблица 2. *Параметры рельсотрона с шинами из хромовой бронзы*

a	c	b	β	δ_0	I	$\vartheta_{\text{ср}}$	γ	f	L_0	R_0
мм	мм	мм	–	А/мм^2	МА	°С	1/Ом	Гц	мкГн/м	мкОм/м
50	70	100	0,603	600	4,2	136	33,9·10^6	0	0,521	8,43
								5	0,509	9,16
								50	0,452	28,79
								500	0,356	91,04
								5000	0,300	157,14
q	N	τ	T	$f_{\text{и}}$	$I_{\text{и}}$	B_1	W_m	$\sigma_{\text{ср}}$	$L_{0\text{э}}$	$R_{0\text{э}}$
–	–	мс	мс	Гц	МА	Тл	МДж/м	МПа	мкГн/м	мкОм/м
1	25	4	4	250	4,2	22,66	8,84	550	0,501	17,86
$m_{\text{т}}$	$l_{\text{р}}$	V_m	I_m	U_m	P_m	P_τ	P_T	$W_{\text{п}}$	$W_{\text{т}}$	η
кг	м	км/с	МА	кВ	МВт	МВт	МВт	МДж	МДж	–
5,894	6	3	5,94	14,04	29170	7030	7030	28,12	26,55	0,944
2,947	12	6		28,08	58330	14060	14060	56,24	53,10	
1,966	18	9		42,10	87450	21080	21080	84,32	79,60	

С увеличением скважности q при постоянной степени n, постоянном среднем повышении температуры шин $\vartheta_{ср}$ и неизменной длительности импульса тока τ повышаются амплитуда тока I_m, действующее значение импульса $I_и$, механическое напряжение в шинах $\sigma_{ср}$, максимальная скорость тела V_m при уменьшении числа импульсов N и частоты их следования $f_и$. При сохранении допустимого среднего повышения температуры шин $\vartheta_{ср}$, допустимой механической напряженности и максимальной скорости тела V_m возможно применение вместо бериллиевой бронзы хромовой бронзы с более высокой удельной проводимостью γ, но обладающей меньшей допустимой механической напряженностью $\sigma_{доп}$. Это приводит к увеличению усредненной плотности тока δ_0, числа импульсов N, частоты их следования $f_и$, длительности импульса τ, средней потребляемой рельсотроном мощности P_T, массы ускоряемого тела $m_т$, длины рельсотрона $l_р$ и эффективности преобразования энергии η. Однако происходит уменьшение скважности импульсов q, амплитуды тока I_m и максимальной потребляемой рельсотроном мощности P_m.

Таким образом, по полученным формулам (1)–(35) можно рассчитывать параметры рельсотронов при периодических несинусоидальных токах.

Выводы

1. Предложена методика расчета параметров рельсотронов при периодических несинусоидальных токах, позволяющая определять возможности рельсотронов в режиме поочередного ускорения одинаковых тел.
2. С увеличением скважности импульсов тока при постоянном среднем повышении температуры шин повышаются амплитуда тока, механическое напряжение в шинах, максимальная скорость тела при уменьшении числа импульсов тока и частоты их следования.
3. Для изготовления шин рельсотрона возможно применение вместо бериллиевой бронзы менее прочной, но более дешевой и технологичной хромовой бронзы, обладающей существенно большей удельной проводимостью, что повышает эффективность преобразования энергии рельсотроном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. Т. 1. – СПб.: Питер, 2009. – 512 с.
2. Носов Г.В. Определение параметров рельсотронов. Ч. 1. Расчет при постоянной плотности тока // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 65–69.
3. Носов Г.В. Определение параметров рельсотронов. Ч. 2. Расчет при синусоидальном токе // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 70–74.
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. Яворский Б.М., Селезнев Ю.А. Физика. Справочное руководство. – М.: Физматлит, 2004. – 592 с.

Поступила 01.03.2013 г.

UDC 621.313.12

DETERMINATION OF RAILGUN PARAMETERS. P. 3. COMPUTATION AT PERIODIC NONSINUSOIDAL CURRENT

G.V. Nosov, A.A. Luss

Tomsk Polytechnic University

The authors have obtained the formulas to calculate the parameters of railguns at periodic nonsinusoidal current. Such parameters as the average effective magnetic density of current pulse in the space between the railgun tires, the equivalent inductance and resistance, the average temperature of tires at their adiabatic heating as well as the average mechanical tension in tires were determined. At current pulse relative duration at constant average increase of tire temperature the current amplitude, the mechanical tension in tires, the body peak velocity increase at decrease of current pulse amount and their repetition frequency. In order to produce the railgun tires the chrome bronze may be applied instead of the beryllium one. The chrome bronze is less strong but cheaper and more processable; it possesses higher specific conductivity that increases the efficiency of energy conversion by the railgun.

Key words:
Railgun, tire, parameter, periodic nonsinusoidal current, induction, equivalent inductance, equivalent resistance, mechanical tension, adiabatic heating of tires, increase of temperature.

REFERENCES

1. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* (Theoretical bases of electrical engineering). Saint Petersburg, Piter, 2009. 1, 512 p.
2. Nosov G.V. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013. 322, 4, pp. 65–69.
3. Nosov G.V. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013. 322, 4, pp. 70–74.
4. Gerasimov V.G. *Elektrotekhnicheskiy spravochnik. Obshhie voprosy. Elektrotekhnicheskie materialy* (Electrical engineering reference. General questions. Electric engineering materials). Moscow, Energoatomizdat, 1985. 1, 488 p.
5. Yavorskiy B.M., Seleznev Yu.A. *Fizika* (Physics). Moscow, Fizmatlit, 2004. 592 p.

УДК 621.311.001.57

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ

В.З. Манусов, Н.В. Александров

Новосибирский Государственный Технический Университет
E-mail: alexandrov-88@mail.ru

Актуальность работы обусловлена перспективой широкого использования явления сверхпроводимости в электроэнергетических устройствах, в том числе в трансформаторах с целью снижения потерь в них.

Цель работы: *исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на электромагнитные переходные процессы, определение возможности ограничения токов короткого замыкания с помощью сверхпроводниковых трансформаторов, выявление особенностей при токоограничении с помощью сверхпроводниковых трансформаторов.*

Методы исследования: *расчеты с использованием программного комплекса MatLab, ATP EMTP, использование теории сверхпроводимости, аппарата математического моделирования в электроэнергетике.*

Результаты: *разработана математическая модель электромагнитных и тепловых переходных процессов при ограничении токов короткого замыкания, проведено моделирование процессов перехода сверхпроводникового трансформатора в нормальное состояние (несверхпроводящее) и последующего возврата в сверхпроводящее после устранения короткого замыкания, определен критерий возврата сверхпроводникового трансформатора в сверхпроводящее состояние после устранения короткого замыкания под нагрузкой, определена возможность ограничения токов короткого замыкания с позиции обеспечения требуемого активного сопротивления.*

Ключевые слова:
Сверхпроводящие трансформаторы, электроэнергетические системы, переходные процессы, возврат в сверхпроводящее состояние, математическое моделирование в электроэнергетике.

Открытие в 80-х гг. XX в. материалов, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП) позволило преодолеть главное препятствие использования сверхпроводимости (СП) – громоздкие криогенные системы получения жидкого гелия были заменены более простыми установками жидкого азота при атмосферном давлении. Это открыло новые перспективы создания трансформаторов со сниженными потерями.

Трансформаторы с ВТСП обмотками обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными силовыми трансформаторами: низкие нагрузочные потери, большая перегрузочная способность, нестареющая высококачественная изоляция, меньшие массогабаритные показатели, меньшие уровни шумов, экологическая безопасность [1]. Сверхпроводящие трансформаторы (СПТ) также способны ограничивать токи короткого замыкания (КЗ), что является одним из основных преимуществ таких трансформаторов, т. к. проблема координации токов короткого замыкания является чрезвычайно важной в любой электроэнергетической системе (ЭЭС). Уровень токов КЗ определяет требования при выборе оборудования, а следовательно, позволяет оценить экономичность и надёжность ЭЭС.

Как известно, сверхпроводимость ограничивается тремя параметрами: критическая температура, критический ток, критическое поле. При выходе одного из параметров за пределы, в которых существует сверхпроводимость, сверхпроводник переходит в нормальное, непроводящее состояние. Во избежание повреждения сверхпроводящего материала, при производстве ВТСП проводов используют так называемый стабилизатор, в который вытесняется ток в случае временной потери или ослабления токонесущих свойств сверхпроводника. Структура ВТСП провода второго поколения, выпускаемого фирмой SuperPower (США), представлена на рис. 1. Ширина провода составляет 4...12 мм.