

УДК 538.3:621.313

Расчет бегущего электромагнитного поля в слоистой проводящей среде

Доктор техн. наук, проф. И. М. ПОСТНИКОВ, кандидат физ.-матем. наук Л. П. НИЖНИК,
кандидат физ.-матем. наук А. А. БЕРЕЗОВСКИЙ и инж. А. Н. КРАВЧЕНКО

Киев

Для многих электромеханических и электротермических устройств сильного тока низкой частоты возникает задача расчета бегущего электромагнитного поля и потерь в слоистой проводящей среде. Расчет такого поля рассматривался многими авторами при различных упрощающих предположениях. Так, например, исследование бегущего поля в воздушном зазоре и проводящем полупространстве применительно к электрическим машинам с массивным ротором проведено в работе [Л. 1]. В ряде работ [Л. 2, 3 и др.] рассматриваются вопросы расчета вихревых токов при возбуждении электромагнитного поля токами периодической плотности, расположенными вблизи этих тел. В настоящее время весьма актуальной является задача расчета электромагнитного поля и потерь в мощных турбогенераторах и трансформаторах. Решение этой задачи также приводит к необходимости исследования пульсирующих или бегущих магнитных полей, создаваемых переменным током в областях с различными электрическими и магнитными свойствами.

В данной работе рассматривается бегущее электромагнитное поле в трехслойной среде, состоящей из воздушного зазора с заданным бегущим токовым слоем и двух проводящих полупространств. Подобная задача встречается при исследовании магнитного поля, возбуждаемого током лобовых частей турбогенератора, а также магнитного поля в активной зоне двигателей с массивным ротором, печатной обмоткой и т. п.

Постановка задачи. Рассмотрим бесконечно тонкий слой тока с периодической линейной плотностью $Ie^{j(\lambda x - \omega t)}$, направленный по оси z , бегущий вдоль оси x и расположенный в воздушном зазоре между двумя проводящими полупространствами (рис. 1). Здесь I — амплитуда линейной плотности тока (линейная нагрузка), ω и $\lambda = \frac{\pi}{\tau}$ — временная и

пространственная частоты, τ — пространственный полупериод. Магнитной проницаемости μ и удельному сопротивлению ρ нижнего полупространства ($y < -h_1$) воздушного зазора ($-h_1 \leq y \leq h - h_1$) и верхнего полупространства ($y > h - h_1$), а также всем остальным величинам, характеризующим электромагнитные процессы в каждой из перечисленных сред, будем приписывать индексы 1, 0 и 2 соответственно.

Задача определения электромагнитного поля, возбуждаемого токовым слоем с линейной плотностью $Ie^{j(\lambda x - \omega t)}$, заключается в интегрировании системы уравнений Максвелла для каждой из трех сред при определенных условиях на поверхностях раздела сред ($y = -h_1$ и $y = h - h_1$) и при $y = \pm \infty$. Решение этой задачи приведено в приложении I. Здесь мы воспроизведем его результаты в более полном виде.

Если обозначить через E_k , H_k и B_k ($k=1, 2$) значения касательных составляющих напряженностей электрического $E(y)$ и магнитного $H_x(y)$ полей и нормальной составляющей магнитной индукции на плоскостях раздела сред $y = -h_1$ и $y = h - h_1$, то, как следует из приложения I, составляющие электромагнитного поля в рассматриваемой задаче имеют вид:

для полупространства $y < -h_1$

$$\left. \begin{aligned} E(x, y, t) &= E_1 e^{\alpha_1(y+h_1)} e^{j(\lambda x - \omega t)}, \\ H_x(x, y, t) &= H_1 e^{\alpha_1(y+h_1)} e^{j(\lambda x - \omega t)}, \\ B_y(x, y, t) &= B_1 e^{\alpha_1(y+h_1)} e^{j(\lambda x - \omega t)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

для полупространства $y > h - h_1$

$$\left. \begin{aligned} E(x, y, t) &= E_2 e^{-\alpha_2(y-h+h_1)} e^{j(\lambda x - \omega t)}, \\ H_x(x, y, t) &= H_2 e^{-\alpha_2(y-h+h_1)} e^{j(\lambda x - \omega t)}, \\ B_y(x, y, t) &= B_2 e^{-\alpha_2(y-h+h_1)} e^{j(\lambda x - \omega t)}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

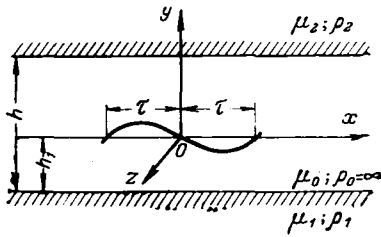


Рис. 1.

для воздушного зазора $-h_1 \leq y \leq h - h_1$

$$\left. \begin{aligned} E(x, y, t) &= \left[-Z_0 I \Phi(y) + E_1 \frac{\text{sh } \alpha_0 (h - h_1 - y)}{\text{sh } \alpha_0 h} + \right. \\ &\quad \left. + E_2 \frac{\text{sh } \alpha_0 (h_1 + y)}{\text{sh } \alpha_0 h} \right] e^{j(\lambda x - \omega t)}, \\ H_x(x, y, t) &= \left[I \Psi(y) + H_1 \frac{\text{sh } \alpha_0 (h - h_1 - y)}{\text{sh } \alpha_0 h} + \right. \\ &\quad \left. + H_2 \frac{\text{sh } \alpha_0 (h_1 + y)}{\text{sh } \alpha_0 h} \right] e^{j(\lambda x - \omega t)}, \\ B_y(x, y, t) &= \left[-j\mu_0 I \Phi(y) + B_1 \frac{\text{sh } \alpha_0 (h - h_1 - y)}{\text{sh } \alpha_0 h} + \right. \\ &\quad \left. + B_2 \frac{\text{sh } \alpha_0 (h_1 + y)}{\text{sh } \alpha_0 h} \right] e^{j(\lambda x - \omega t)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$\Phi(y) = \begin{cases} \frac{\text{sh } \alpha_0 (h - h_1) \text{sh } \alpha_0 (h_1 + y)}{\text{sh } \alpha_0 h} & \text{при } -h_1 \leq y \leq 0; \\ \frac{\text{sh } \alpha_0 h_1 \text{sh } \alpha_0 (h - h_1 - y)}{\text{sh } \alpha_0 h} & \text{при } 0 \leq y \leq h - h_1; \end{cases} \quad (4)$$

$$\Psi(y) = \begin{cases} \frac{\text{ch } \alpha_0 (h - h_1) \text{sh } \alpha_0 (h_1 + y)}{\text{sh } \alpha_0 h} & \text{при } -h_1 \leq y \leq 0; \\ -\frac{\text{ch } \alpha_0 h_1 \text{sh } \alpha_0 (h - h_1 - y)}{\text{sh } \alpha_0 h} & \text{при } 0 \leq y \leq h - h_1. \end{cases}$$

Значения составляющих электромагнитного поля E_k , H_k и B_k выражаются через линейную плотность тока I , геометрические размеры и комплексные сопротивления сред следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} E_k &= -Z_k a_k I e^{-\alpha_0 h_k} = -v_k Z_k^{(M)} \cdot \frac{1}{2} a_k I e^{-\alpha_0 h_k}; \\ H_k &= (-1)^k \frac{Z_k}{Z_k^{(M)}} a_k I e^{-\alpha_0 h_k} = \\ &= (-1)^k v_k \cdot \frac{1}{2} a_k I e^{-\alpha_0 h_k}; \\ B_k &= -j\mu_0 \frac{Z_k}{Z_0} a_k I e^{-\alpha_0 h_k} = \\ &= -j\mu_0 w_k \cdot \frac{1}{2} a_k I e^{-\alpha_0 h_k} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

($k = 1, 2$; $h_{k=2} = h - h_1$).

Дадим пояснения величинам, входящим в выражения (1)–(5).

При изучении электромагнитного поля весьма полезным является введение нормального комплекс-

ного сопротивления среды [Л. 4 и 5], под которым обычно понимают отношение касательных составляющих напряженностей электрического и магнитного полей в данной среде. Определяя таким образом нормальные комплексные сопротивления каждой из трех сред, получаем для них следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= -j\omega \frac{\mu_0}{\alpha_0}; \\ Z_k^{(M)} &= -j\omega \frac{\mu_k}{\alpha_k} \quad (k=1, 2), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\alpha_0 = \frac{\pi}{\tau}$ и $\alpha_k = \sqrt{\alpha_0^2 - j\omega \frac{\mu_k}{\alpha_k}}$ — постоянные распространения в воздухе и проводящих полупространствах.

Для удобства анализа электромагнитного поля в рассматриваемой слоистой среде наряду с нормальными сопротивлениями сред в выражения (1)–(5) введено также общее сопротивление сред воздух — проводящие полупространства Z_k , связанное с сопротивлениями Z_0 и $Z_k^{(M)}$ зависимостью

$$\frac{1}{Z_k} = \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_k^{(M)}} \quad (k=1, 2). \quad (7)$$

Наконец, в выражения (1)–(5) входят коэффициенты прозрачности [Л. 4 и 6]

$$v_k = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_k^{(M)}} \quad \text{и} \quad w_k = \frac{2Z_k^{(M)}}{Z_0 + Z_k^{(M)}} \quad (k=1, 2), \quad (8)$$

а также коэффициенты взаимного влияния проводящих полупространств

$$a_1 = \frac{1 + x_2 e^{-2\alpha_0(h-h_1)}}{1 - x_1 x_2 e^{-2\alpha_0 h}}; \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{1 + x_2 e^{-2\alpha_0 h_1}}{1 - x_1 x_2 e^{-2\alpha_0 h}}, \quad (10)$$

где $x_k = \frac{Z_k^{(M)} - Z_0}{Z_k^{(M)} + Z_0}$ — коэффициент отражения от проводящих полупространств.

Физический смысл коэффициентов a_1 и a_2 будет ясен из дальнейшего.

Анализ общего комплексного сопротивления. Общее комплексное сопротивление сред воздух — проводящее полупространство, определяемое зависимостью (7), является весьма удобным средством анализа электромагнитных процессов в слоистой среде. Результаты этого анализа используются в дальнейшем при определении удельных потерь в проводящей среде.

Постоянная распространения α_k в проводящей среде является величиной комплексной и может быть разложена на действительную и мнимую части:

$$\alpha_k = \sqrt{\alpha_0^2 - j\omega \frac{\mu_k}{\rho_k}} = \varphi_k - j\psi_k \quad (k=1, 2), \quad (11)$$

где $\varphi_k = \text{Re } \alpha_k \geq 0$ — величина, характеризующая быструю затухания электромагнитного поля в проводящей среде;

$\frac{1}{\varphi_k}$ — глубина проникновения;

$$\psi_k = -\operatorname{Im} \alpha_k;$$

$\frac{2\pi}{\psi}$ — длина волны электромагнитного поля в проводящей среде.

После несложных преобразований получаем:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha_0 \sqrt{1 + \sqrt{1 + \xi_k^2}}; \\ \psi_k &= \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha_0 \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \xi_k^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где

$$\xi_k = \frac{\omega \mu_k}{\rho_k \alpha_0^2}.$$

Если пользоваться соотношением

$$\operatorname{tg} \theta_k = \xi_k = \frac{2\tau^2}{\pi^2 \Delta_k^2}, \quad (13)$$

ввести угол θ_k , характеризующий связь между пространственным полупериодом τ рассматриваемой волны и глубиной проникновения плоской однородной волны в металл $\Delta_k = \sqrt{\frac{2\rho_k}{\omega \mu_k}}$, то φ_k и ψ_k можно также представить в виде

$$\varphi_k = \alpha_0 \frac{\cos \frac{\theta_k}{2}}{\sqrt{\cos \theta_k}}; \quad \psi_k = \alpha_0 \frac{\sin \frac{\theta_k}{2}}{\sqrt{\cos \theta_k}}. \quad (14)$$

Используя выражения (12) для φ_k и ψ_k и зависимость (7), получаем следующее выражение для вещественных частей общих комплексных сопротивлений сред воздух—проводящее полупространство:

$$\operatorname{Re} Z_k = \frac{\omega \frac{\psi_k}{\mu_k}}{\left(\frac{\alpha_0}{\mu_0} + \frac{\varphi_k}{\mu_k} \right)^2 + \frac{\varphi_k^2}{\mu_k^2}} \quad (15)$$

или

$$\operatorname{Re} Z_k = \frac{\omega \mu_0}{\sqrt{2} \alpha_0} \times \frac{\mu'_k \xi_k}{\sqrt{1 + \sqrt{1 + \xi_k^2} (\mu'^2_k + \sqrt{1 + \xi_k^2})} + \sqrt{2} \mu'_k (1 + \sqrt{1 + \xi_k^2})}. \quad (16)$$

В случае $\mu'_k = 1$ выражение (16) упрощается:

$$\operatorname{Re} Z_k = \frac{\omega \mu_0}{\sqrt{2} \alpha_0} \frac{\sqrt{1 + \sqrt{1 + \xi_k^2}} - \sqrt{2}}{\xi_k^2}, \quad (17)$$

где $\xi_k = \frac{\omega \mu_0}{\rho_k \alpha_0^2}$.

Выпишем также приближенные выражения для $\operatorname{Re} Z_k$ в двух случаях.

а) При $\frac{\tau}{\Delta_k} \gg 1$, где $\Delta_k = \sqrt{\frac{2\rho_k}{\omega \mu_k}}$, получим:

$$\operatorname{Re} Z_k = \sqrt{\frac{\omega \mu_k \rho_k}{2}}. \quad (18)$$

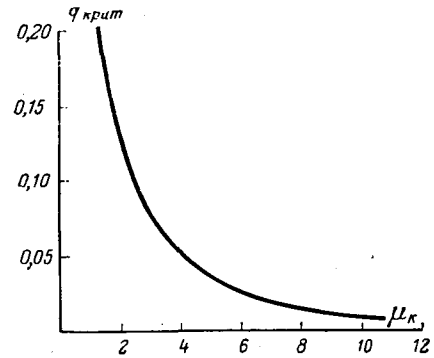


Рис. 2.

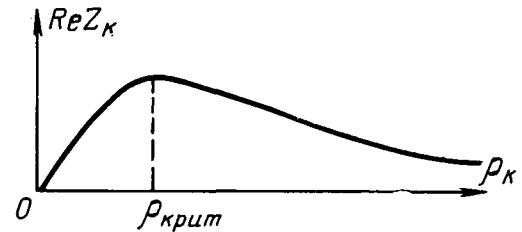


Рис. 3.

Таким образом, $\operatorname{Re} Z_k$ в этом случае приблизительно равно поверхностному сопротивлению для плоской однородной волны.

б) При $\frac{\tau}{\Delta_k} \ll 1$ имеем:

$$\operatorname{Re} Z_k = \frac{1}{2} \frac{\omega^2 \mu_k^2}{(1 + \mu'_k)^2 \alpha_0^3 \rho_k}. \quad (19)$$

Выражение (16) с учетом зависимости (13) можно представить также в виде

$$\operatorname{Re} Z_k = \frac{\omega \mu_0}{2 \alpha_0} \frac{\sqrt{2\gamma q (1 - q)}}{1 + \gamma q + \sqrt{2\gamma q (1 + q)}}, \quad (20)$$

где $q = \cos \theta_k$, $\gamma = \mu'^2_k$. (21)

Полученное выражение (20) позволяет найти максимум $\operatorname{Re} Z_k$ как функции ρ_k при фиксированных ω , μ_0 , μ_k , α_0 . Этот максимум достигается, когда q является корнем кубического уравнения

$$(2 - \gamma)^2 q^3 + \gamma (2 + \gamma)^2 q^2 - (3 + 2\gamma) q + 1 = 0. \quad (22)$$

Зависимость q от μ'_k , даваемая этим уравнением, изображена на рис. 2.

В частности, при $\mu'_k = 1$ это уравнение имеет корень $q_1 = 1$ и приводится к квадратному уравнению

$$q^2 + 4q - 1 = 0 \quad (23)$$

с корнями $q_{2,3} = -2 \pm \sqrt{5}$.

Так как $0 < \theta_k \leq \frac{\pi}{2}$, то $\cos \theta_k = \sqrt{5} - 2$, $\operatorname{tg} \theta_k = 2 \sqrt{2 + \sqrt{5}}$, и следовательно, в случае $\mu'_k = 1$ максимум $\operatorname{Re} Z_k$ достигается при

$$\rho_{\text{крит}} = \frac{\omega \mu_0}{c \alpha_0^2} \approx 0,025 \omega \mu_0 \tau^2, \quad (24)$$

где

$$c = 2\sqrt{2 + \sqrt{5}} \approx 4,125.$$

Проведенный анализ формулы (16) позволяет построить график $\operatorname{Re} Z_k$ в зависимости от ρ_k (рис. 3). Из графика видно, что при малых ρ_k кривая $\operatorname{Re} Z_k$ приближенно может быть заменена параболой (18), а при больших ρ_k — гиперболой (19). Максимум $\operatorname{Re} Z_k$ достигается при ρ_k , которое определяется по корням уравнения (22).

Удельные потери в проводящих полупространствах. Удельные потери, т. е. потери на единицу поверхности проводящей среды, могут быть определены по напряженности электрического поля и удельному сопротивлению проводящей среды:

$$P_1 = \frac{1}{2\rho_1} \int_{-\infty}^{-h_1} |E_1|^2 dy \quad (25)$$

или же по вещественной части нормальной составляющей вектора Пойнтинга

$$P_1 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (EH_x^*). \quad (26)$$

Исходя из формулы (25), получаем:

$$P_k = \frac{1}{2\rho_k} |Z_k|^2 |a_k|^2 |I|^2 e^{-2\alpha_0 h_k} \quad (27)$$

$$(k = 1, 2; h_{k=2} = h - h_1),$$

или после ряда преобразований

$$P_k = \frac{1}{2} \operatorname{Re} Z_k |a_k|^2 |I|^2 e^{-2\alpha_0 h_k}. \quad (28)$$

Таким образом, удельные потери в проводящей среде выражаются через линейную нагрузку I , коэффициенты взаимного влияния проводящих полупространств a_1 и a_2 , геометрические размеры и пропорциональны действительной части общего сопротивления Z_k . Анализ различных выражений для $\operatorname{Re} Z_k$, проведенный выше, может быть использован при численных расчетах удельных потерь.

Приведем также формулы для удельных потерь через значения тангенциальной составляющей напряженности H_k и нормальной составляющей индукции B_k магнитного поля на поверхности проводящих полупространств:

$$P_k = \frac{1}{2} \operatorname{Re} Z_k^{(M)} |H_k|^2; \quad (29)$$

$$P_k = \frac{1}{2} \frac{\alpha_0^2 \omega^2}{2\rho_k \varphi_k} |B_k|^2 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \frac{1}{Z_k^{(M)}} |Z_0|^2 |B_k|^2. \quad (30)$$

Бегущий токовый слой над проводящим полупространством. Рассмотрим случай, когда бесконечно тонкий слой тока с линейной плотностью $Ie^{i(\lambda x - \omega t)}$ расположен на расстоянии h_1 от проводящего полупространства (рис. 4).

Выражения для составляющих электромагнитного поля и потерь в этом случае легко могут быть получены из формул (1), (3) — (5) и (28), если в них принять $h - h_1 \rightarrow \infty$.

В частности, электромагнитное поле в полупро-

странстве $y < -h_1$ определяется формулами (1). При этом значения составляющих на поверхности $y = -h_1$ равны:

$$\begin{aligned} E_1 &= -Z_1 I e^{-\alpha_0 h_1}; \\ H_1 &= -\frac{Z_1}{Z_1^{(M)}} I e^{-\alpha_0 h_1}; \\ B_1 &= -i\mu_0 \frac{Z_1}{Z_0} I e^{-\alpha_0 h_1}. \end{aligned} \quad (31)$$

Формула для удельных потерь (28) принимает вид:

$$P_1 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} Z_1 |I|^2 e^{-2\alpha_0 h_1}. \quad (32)$$

Легко усмотреть, что формулы (31) и (32) непосредственно следуют из общих зависимостей (5) и (28), если в них положить $a_1 = 1$. Это замечание позволяет выяснить физический смысл коэффициента взаимного влияния проводящих полупространств: наличие второго проводящего полупространства эквивалентно изменению амплитуды линейной плотности тока в a_1 раз.

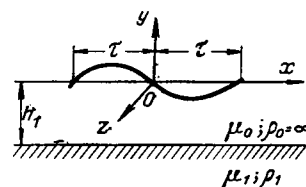


Рис. 4.

Следует отметить, что в случае бегущего токового слоя, расположенного над проводящим полупространством, как следует из формулы (32), удельные потери при фиксированных I , τ , μ_1 и h_1 пропорциональны $\operatorname{Re} Z_1$ и, следовательно, зависимость потерь от удельного сопротивления ρ_1 описывается функцией (16). График этой функции приведен на рис. 3.

Бегущий токовый слой между проводящим полупространством и полупространством с бесконечным удельным сопротивлением. Пусть бегущий слой тока с линейной плотностью $Ie^{i(\lambda x - \omega t)}$ расположен в воздушном зазоре, образованном нижним проводящим полупространством и верхним полупространством с бесконечно большим удельным сопротивлением. Этот случай обычно принимается в качестве расчетной модели при исследовании электромагнитных процессов в электрических машинах с массивным ротором [Л. 1].

Коэффициент отражения от верхнего непроводящего полупространства равен:

$$\kappa_2 = 1 - \frac{2}{1 + \mu'_2},$$

где

$$\mu'_2 = \frac{\mu_2}{\mu_0}, \quad (33)$$

и при $\mu'_2 \gg 1$ (что имеет место для статора в машинах с массивным ротором) $\kappa_2 \approx 1$.

Отметим, что $\kappa_2 = 1$ и в другом предельном случае: при $\mu'_2 = \infty$, $\rho_2 \neq \infty$. Поэтому приведенный ниже анализ справедлив и для этого случая.

Значения напряженностей электрического и магнитного полей, а также нормальной составляющей индукции (5) при $\kappa_2 = 1$ принимают вид:

$$H_1 = I \frac{\operatorname{ch} \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch} \alpha_0 h} \frac{\tilde{Z}}{Z_1^{(M)}}; \quad (34)$$

$$E_1 = I \frac{\operatorname{ch} \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch} \alpha_0 h} \tilde{Z};$$

$$B_1 = i\mu_0 I \frac{\operatorname{ch} \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch} \alpha_0 h} \frac{\tilde{Z}}{Z_0},$$

где \tilde{Z} — комплексное сопротивление, определяемое равенством

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1^{(M)}} + \frac{1}{Z_0} \operatorname{th} \alpha_0 h. \quad (35)$$

Из (34) следуют выражения для квадратов модулей напряженности магнитного поля и индукции:

$$|H_1|^2 = |I|^2 \frac{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 h} \frac{\varphi_1^2 + \psi_1^2}{(\varphi_1 + \mu'_1 \alpha_0 \operatorname{th} \alpha_0 h)^2 + \psi_1^2}; \quad (36)$$

$$|B_1|^2 = |I|^2 \frac{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 h} \frac{\alpha_0^2 \mu_1^2}{(\varphi_1 + \mu'_1 \alpha_0 \operatorname{th} \alpha_0 h)^2 + \psi_1^2}. \quad (37)$$

Отметим, что выражение (37) при $h - h_1 = 0$ и упрощениях, принятых в работе [Л. 1], совпадает с формулой (32) этой работы.

Удельные потери, определяемые формулой (29), в рассматриваемом случае могут быть выражены через действительную часть сопротивления \tilde{Z} , линейную плотность тока I и геометрические размеры:

$$P_1 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \tilde{Z} |I|^2 \frac{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 h}, \quad (38)$$

причем выражению для $\operatorname{Re} \tilde{Z}$ можно придать вид:

$$\operatorname{Re} \tilde{Z} = \frac{\omega \frac{\psi_1}{\mu_1}}{\left(\frac{\alpha_0}{\mu_0} \operatorname{th} \alpha_0 h + \frac{\varphi_1}{\mu_1} \right)^2 + \frac{\psi_1^2}{\mu_1^2}}. \quad (39)$$

Сравнение \tilde{Z} и $\operatorname{Re} \tilde{Z}$, определяемых формулами (35) и (39), с Z_1 и $\operatorname{Re} Z_1$, полученными по формулам (6) и (15) при произвольных параметрах сред μ_1 , ρ_1 и μ_2 , ρ_2 , позволяет сделать вывод, что $\tilde{Z} = Z_1$ и $\operatorname{Re} \tilde{Z} = \operatorname{Re} Z_1$, если в формулах (6) и (15) в качестве магнитной проницаемости воздуха μ_0 взять $\tilde{\mu}_0 = \mu_0 \operatorname{cth} \alpha_0 h$. Следовательно, проведенный выше анализ общего комплексного сопротивления применим и в рассматриваемом здесь случае, когда $\kappa_2 = 1$.

Выражая далее по формулам (14) и (15) φ_1 и ψ_1 через α_0 и угол θ_1 можно получить следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} |H_1|^2 &= |I|^2 \frac{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 h} f(\theta_1); \\ |B|^2 &= \mu_1^2 |I|^2 \frac{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 h} f(\theta_1) \cos \theta_1; \\ P_1 &= \frac{1}{2} |I|^2 \frac{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch}^2 \alpha_0 h} \frac{\omega \mu_1}{\alpha_0} f(\theta_1) \sin \frac{\theta_1}{2} \sqrt{\cos \theta_1}, \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

где

$$f(\theta_1) = \frac{1}{1 + 2\mu'_1 \cos \frac{\theta_1}{2} \sqrt{\cos \theta_1} \operatorname{th} \alpha_0 h + \mu_1'^2 \operatorname{th}^2 \alpha_0 h \cos \theta_1}. \quad (41)$$

В случае, когда τ намного больше глубины проникновения плоской однородной волны в металл $\Delta_1 = \sqrt{\frac{2\rho_1}{\omega\mu_1}}$, для расчета электромагнитного поля и удельных потерь можно пользоваться следующими приближенными формулами:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &\approx I \frac{\operatorname{ch} \alpha_0 (h - h_1)}{\operatorname{ch} \alpha_0 h}; \\ B_1 &\approx \frac{j-1}{2} \mu_1 H_1 \Delta_1 \alpha_0; \\ W_1 &\approx \frac{1}{2} r_1 |H_1|^2, \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

где

$$r_1 = \sqrt{\frac{\omega\mu_1\rho_1}{2}}.$$

Приложение I. Задача определения электромагнитного поля в трехслойной среде, состоящей из воздушного зазора с бесконечно тонким слоем тока с линейной плотностью $Ie^{i(\lambda x - \omega t)}$, направленным по оси z , и двух проводящих полупространств (рис. 1), сводится к решению уравнений Максвелла относительно векторов напряженностей электрического E и магнитного $H = \frac{1}{\mu} \nabla \times A$ поля

$$\operatorname{rot} H = \frac{1}{\rho} E, \quad (I-1)$$

$$\operatorname{rot} E = i\omega\mu H \quad (I-2)$$

при равенстве касательных составляющих напряженностей электрического и магнитного поля на поверхностях раздела воздушного зазора и проводящих полупространств $y = -h_1$ и $y = h - h_1$, а также нормальной составляющей магнитной индукции по обе стороны каждой из этих поверхностей.

Кроме того, при переходе через токовый слой касательная составляющая напряженности магнитного поля терпит скачок, равный линейной плотности тока, а на бесконечности при $y = \pm \infty$ составляющие векторов E и H должны обращаться в нуль.

Здесь при записи уравнений Максвелла (I-1), (I-2) зависимость векторов поля от времени принята в виде $e^{-i\omega t}$, а током смещения пренебрегают по сравнению с током проводимости.

Поскольку плоскости раздела воздушного зазора и проводящих полупространств $y = -h_1$ и $y = h - h_1$ простираются вдоль координатных осей x и z до бесконечности, а возбуждающий поле ток с линейной плотностью $Ie^{i(\lambda x - \omega t)}$ не зависит от z , то и векторы поля E и H также не зависят от z . Вектор E имеет единственную составляющую $E = E_z$, а вектор H — составляющие H_x и H_y .

Линейность уравнений Максвелла (I-1), (I-2) и однородность условий сопряжения на плоскостях $y = -h_1$ и $y = h - h_1$ позволяет произвести разделение переменных, поделив множитель $e^{i(\lambda x - \omega t)}$:

$$\left. \begin{aligned} E(x, y, t) &= E(y) e^{i(\lambda x - \omega t)}; \\ H(x, y, t) &= H(y) e^{i(\lambda x - \omega t)}. \end{aligned} \right\} \quad (I-3)$$

Далее, из уравнения (I-2) и зависимости (I-3) получаем, что составляющие вектора $H(y)$ выражаются через $E(y)$ следующим образом:

$$H_x(y) = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{dE(y)}{dy}; \quad H_y(y) = -\frac{\lambda}{\omega\mu} E(y) \quad (I-4)$$

и, следовательно, электромагнитное поле в рассматриваемой задаче полностью определяется через $E(y)$.

Из уравнений Максвелла (I-1), (I-2) и условий сопряжения на плоскостях $y = -h_1$ и $y = h - h_1$ получаем следующие краевые задачи для определения $E(y)$ во всех трех областях:

1) в области воздушного зазора вне токового слоя $(-h_1 \leq y \leq h - h_1)$

$$\frac{d^2 E(y)}{dy^2} - \alpha_0^2 E(y) = 0; \quad (I-5)$$

$$(\alpha_0 = \lambda)$$

$$E(-h_1) = E_1; \quad E(h - h_1) = E_2;$$

2) в полупространстве $-\infty < y \leq -h_1$

$$\frac{d^2 E(y)}{dy^2} - \alpha_1^2 E(y) = 0$$

$$(\alpha_1^2 = \alpha_0^2 - i \frac{\omega \mu_1}{\rho_1}, \quad \text{Re } \alpha_1 \geq 0); \quad (I-6)$$

$$E(-h_1) = E_1; \quad E(-\infty) = 0;$$

3) в полупространстве $+\infty > y > h - h_1$

$$\frac{d^2 E(y)}{dy^2} - \alpha_2^2 E(y) = 0 \quad (I-7)$$

$$(\alpha_2^2 = \alpha_0^2 - i \frac{\omega \mu_2}{\rho_2}, \quad \text{Re } \alpha_2 \geq 0);$$

$$E(h - h_1) = E_2; \quad E(+\infty) = 0.$$

Здесь E_1 и E_2 — значения напряженностей электрического поля на плоскостях раздела сред $y = -h_1$ и $y = h - h_1$. Они могут быть определены из условия непрерывности касательных составляющих напряженности магнитного поля $H_x(y)$ по обе стороны каждой из плоскостей раздела $y = -h_1$ и $y = h - h_1$. Если $H_x(y)$ выразить через $E(y)$ по формуле (I-4), то это условие можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{j\omega\mu_1} \frac{dE(-h_1 - 0)}{dy} &= \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{dE(-h_1 + 0)}{dy}; \\ \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{dE(h - h_1 - 0)}{dy} &= \frac{1}{j\omega\mu_2} \frac{dE(h - h_1 + 0)}{dy}. \end{aligned} \right\} \quad (I-8)$$

Переходя к определению $E(y)$ в воздушном зазоре, разделим последний на области $-h_1 \leq y < 0$ и $0 < y \leq h - h_1$ и обозначим $E(y)$ через $E'(y)$ в первой области и через $E''(y)$ во второй области. Тогда, как следует из (I-5), $E'(y)$ удовлетворяет однородному дифференциальному уравнению

$$\frac{d^2 E'(y)}{dy^2} - \alpha_0^2 E'(y) = 0, \quad (I-9)$$

а $E''(y)$ удовлетворяет тому же уравнению при замене $E'(y)$ на $E''(y)$.

Общее решение уравнения (I-9), удовлетворяющее условию $E'(-h_1) = E_1$, можно записать в виде

$$E'(y) = A_1 \text{sh } \alpha_0(y + h_1) + E_1 \text{ch } \alpha_0(y + h_1). \quad (I-10)$$

Аналогично, общее решение дифференциального уравнения относительно $E''(y)$, удовлетворяющее условию $E''(h - h_1) = E_2$, имеет вид:

$$E''(y) = A_2 \text{sh } \alpha_0(y - h + h_1) + E_2 \text{ch } \alpha_0(y - h + h_1). \quad (I-11)$$

Здесь A_1 и A_2 — произвольные постоянные, которые определяются из условия непрерывности касательных составляющих напряженности электрического поля при переходе через токовый слой:

$$E'(0 - 0) = E''(0 + 0), \quad (I-12)$$

а также из условия, что касательная составляющая напряженности магнитного поля при переходе через токовый слой терпит скачок, равный плотности тока:

$$\frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{dE'(0 - 0)}{dy} - \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{dE''(0 + 0)}{dy} = I. \quad (I-13)$$

Подставляя далее значения $E'(y)$ из (I-10) и $E''(y)$ из (I-11) в (I-12) и (I-13), получаем систему двух алгебраических уравнений относительно A_1 и A_2 :

$$\left. \begin{aligned} A_1 \text{sh } \alpha_0 h_1 + E_1 \text{ch } \alpha_0 h_1 &= A_2 \text{sh } \alpha_0(h_1 - h) + \\ &+ E_2 \text{ch } \alpha_0(h_1 - h); \\ A_1 \text{ch } \alpha_0 h_1 + E_1 \text{sh } \alpha_0 h_1 - A_2 \text{ch } \alpha_0(h_1 - h) - \\ &- E_2 \text{sh } \alpha_0(h_1 - h) = -Z_0 I. \end{aligned} \right\} \quad (I-14)$$

Решив эту систему и подставив полученные для A_1 и A_2 значения в (I-10) — (I-11), получим следующие окончательные выражения для $E(y)$ в области воздушного зазора:

$$\left. \begin{aligned} E(y) &= Z_0 I \frac{\text{sh } \alpha_0(h - h_1) \text{sh } \alpha_0(h_1 + y)}{\text{sh } \alpha_0 h} + \\ &+ E_1 \frac{\text{sh } \alpha_0(h - h_1 - y)}{\text{sh } \alpha_0 h} + \\ &+ E_2 \frac{\text{sh } \alpha_0(h_1 + y)}{\text{sh } \alpha_0 h} \quad (-h_1 \leq y \leq 0); \\ E(y) &= -Z_0 I \frac{\text{sh } \alpha_0 h_1 \text{sh } \alpha_0(y - h + h_1)}{\text{sh } \alpha_0 h} + \\ &+ E_1 \frac{\text{sh } \alpha_0(h - h_1 - y)}{\text{sh } \alpha_0 h} + \\ &+ E_2 \frac{\text{sh } \alpha_0(h_1 + y)}{\text{sh } \alpha_0 h} \quad (0 \leq y \leq h - h_1), \end{aligned} \right\} \quad (I-15)$$

где $Z_0 = -j\omega \frac{\mu_0}{\alpha_0}$ — нормальное сопротивление воздушной среды.

Решения второй и третьей краевых задач, определяемых уравнениями (I-6) и (I-7), получаются соответственно в виде

$$E(y) = E_1 e^{\alpha_1(y + h_1)} \quad (-\infty < y \leq -h_1); \quad (I-16)$$

$$E(y) = E_2 e^{-\alpha_2(y - h + h_1)} \quad (h - h_1 \leq y < +\infty). \quad (I-17)$$

Перейдем к определению значений напряженностей электрического поля E_1 и E_2 на плоскостях раздела $y = -h_1$ и $y = h - h_1$. Для этого, подставив найденные выше выражения (I-15) — (I-17) для $E(y)$ во всех трех областях в условия сопряжения (I-8), получим систему двух линейных алгебраических уравнений относительно E_1 и E_2 :

$$\left. \begin{aligned} Z_0 E_1 \text{sh } \alpha_0 h &= Z_1^{(M)} [Z_0 I \text{sh } \alpha_0(h - h_1) + E_2 - E_1 \text{ch } \alpha_0 h]; \\ -Z_0 E_2 \text{sh } \alpha_0 h &= Z_2^{(M)} [-Z_0 I \text{sh } \alpha_0 h_1 - E_1 + E_2 \text{ch } \alpha_0 h]. \end{aligned} \right\} \quad (I-18)$$

Здесь $Z_1^{(M)} = -j\omega \frac{\mu_1}{\alpha_1}$ и $Z_2^{(M)} = -j\omega \frac{\mu_2}{\alpha_2}$ — нормальные

комплексные сопротивления нижнего и верхнего проводящих полупространств.

Решив систему уравнений (I-18) и выполнив некоторые преобразования, можно значительно упростить и выражения для E_1 и E_2 , представив их в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= -Z_1 a_1 I e^{-\alpha_0 h_1}; \\ E_2 &= -Z_2 a_2 I e^{-\alpha_0(h - h_1)}, \end{aligned} \right\} \quad (I-19)$$

где Z_1 , Z_2 — общие комплексные сопротивления, а a_1 и a_2 — коэффициенты взаимного влияния проводящих полупространств, определяемые формулами (7) — (10).

Используя связь вектора $H(y)$ с $E(y)$, даваемую формулой (I-4), легко получить выражения для H_x и B_y для всех трех областей. Эти выражения приведены в основном тексте статьи.

Приложение II. В качестве примеров применения полученных результатов рассмотрим: а) определение потерь на поверхности массивного ротора турбогенератора от высших гармоник н. с. статора; б) определение моментов вращения от суммы n -х гармоник; в) определение потерь в нажимной плите турбогенератора от поля рассеяния лобовой части.

Амплитуды линейных высших гармоник $A_v = I_v$ известны из расчета машины. По формуле (42) получаем:

$$H_v \approx A_v, \\ P = \sum_v P_v = \sum_v \frac{1}{2} r_{1v} H_v^2,$$

где

$$r_{1v} = \sqrt{\frac{\omega s v \mu_1 \rho_1}{2}};$$

(s_v — скольжение v -й гармоники относительно ротора).

Момент вращения равен:

$$M = \sum M_v = \pi D_1 l_r \sum_v P \frac{v}{s_v}.$$

Уточнение величины H_v может быть сделано по формуле (36).

Применение полученных в статье формул для расчета потерь на поверхности нажимной плиты турбогенератора возможно с некоторым приближением. Токи в лобовых частях создают магнитное поле, бегущее относительно плиты и других неподвижных частей. Амплитуда напряженности этого поля имеет максимальное значение у выхода из паза и равна нулю в конце лобовой части. Поэтому можно принять некоторые среднеквадратичные значения A'_1 и H'_1 . Расстояние от областей с токами до плиты и полюсное деление также переменны и в расчете могут быть взяты некоторые эффективные значения τ' , h' и h'_1 . Наконец, необходимо иметь в виду, что полученные формулы справедливы для среды, имеющей бесконечную длину в направлении оси z , т. е. в них не учитываются тангенциальные токи. Реальное поле имеет более сложный характер, в особенности на границах (в частности, у выхода проводников обмотки из паза).

Для турбогенератора мощностью 200 Мвт получим: $A' = 875$ а/см; $h'_1 = 25$ см; $h' = 91$ см; $\rho_1 = 75 \cdot 10^{-6}$ ом·см;

$$\mu_1 = \mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-8} \text{ гн/см}; \quad \alpha_0 = \frac{\pi}{\tau} = \frac{\pi}{300} = 0,0102 \text{ 1/см}.$$

По формуле (42) находим:

$$H'_1 = A' \frac{\text{ch } \alpha_0 (h' - h'_1)}{\text{ch } \alpha_0} = 875 \frac{\text{ch } (0,0102 \cdot 66)}{\text{ch } (0,0102 \cdot 91)} = 737 \text{ а/см};$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{0,4 \cdot 10^{-8} \cdot 314 \cdot 75 \cdot 10^{-6}}{2}} \cdot 737^2 = 3,3 \text{ вт/см}^2.$$

Проверка по данным выполненных измерений показывает, что, несмотря на указанные выше упрощения, формулы (42) могут быть применены для оценки величины удельных потерь.

Литература

1. Постников И. М., Вихревые токи в синхронных и асинхронных машинах с массивным ротором, «Электричество», 1958, № 10.
2. Марквардт Е. Г., Вихревые токи в ферромагнитных телах, «Электричество», 1934, № 8.
3. Ollendorff F., Berechnung magnetischer Felder, Bd 1., Springer-Verlag, Wien, 1952.
4. Страттон Дж. А., Теория электромагнетизма, Гостехиздат, 1948.
5. Нейман Л. Р. и Калантаров П. Л., Теоретические основы электротехники, ч. III, Госэнергоиздат, 1959.
6. Бреховский Л. М., Волны в слоистых средах, Изд-во АН СССР, 1957.

[2.3.1965]



УДК 621.34:621.3.024

О некоторых возможностях бесколлекторного электропривода постоянного тока

Доктор техн. наук, проф. М. Г. ЧИЛИКИН, кандидат техн. наук А. К. АРАКЕЛЯН
и инж. А. А. АФАНАСЬЕВ

Московский энергетический институт и Волжский филиал МЭИ

Бесколлекторный электропривод постоянного тока на базе синхронной машины и зависимого инвертора обеспечивает регулирование скорости в широких пределах выше и ниже синхронной.

В настоящее время в связи с усовершенствованием ионных и полупроводниковых аппаратов подобная система может быть применена в качестве привода для механизмов, требующих плавного и глубокого регулирования скорости. Использование при этом двухзонного регулирования у быстроходных синхронных машин ($n_c = 3000$ об/мин) позволит исключить применение промежуточных редукторов, что приведет к увеличению к. п. д. установки в целом и обеспечит лучшее использование двигателя в связи с работой его на сверхсинхронных скоростях.

В известных схемах частота на выходе инвертора синхронизируется со скоростью вращения ротора двигателя с помощью датчика положения, который является вращающейся машиной специ-

ального исполнения, предназначенной для управления коммутатором силовых вентилях.

Однако, как показали исследования, электропривод, сконструированный по вышеуказанному принципу, но без датчика положения также обеспечивает двухзонное регулирование скорости в широких пределах с жесткими механическими характеристиками. Для этого зависимый инвертор необходимо синхронизировать с вращающимся ротором посредством э. д. с. вращения, наводимой полем ротора в статорных обмотках двигателя.

При соответствующем законе регулирования тока возбуждения в зависимости от характера нагрузки на валу двигателя можно получить достаточный запас статической и динамической устойчивости, исключающих выпадение двигателя из синхронизма при перегрузках.

Ниже анализируется работа системы в двигательном режиме и устанавливается закон регулирования величины тока возбуждения от заданного

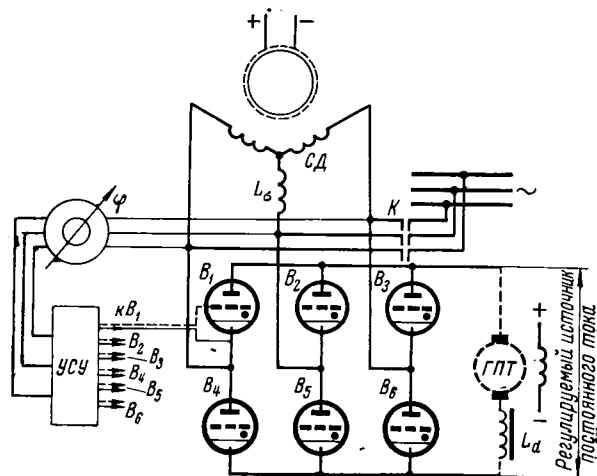


Рис. 1. Принципиальная схема электропривода с синхронным двигателем и вентильным коммутатором.

ГПТ — генератор постоянного тока; СД — синхронный электродвигатель; B_1-B_6 — управляемые вентили; Ф — фазорегулятор; УСУ — устройство сеточного управления вентилей; L_d — индуктивность сглаживающего дросселя; L_0 — индуктивность рассеяния фазы статорной обмотки; К — контакты контактора для асинхронного пуска синхронного электродвигателя.

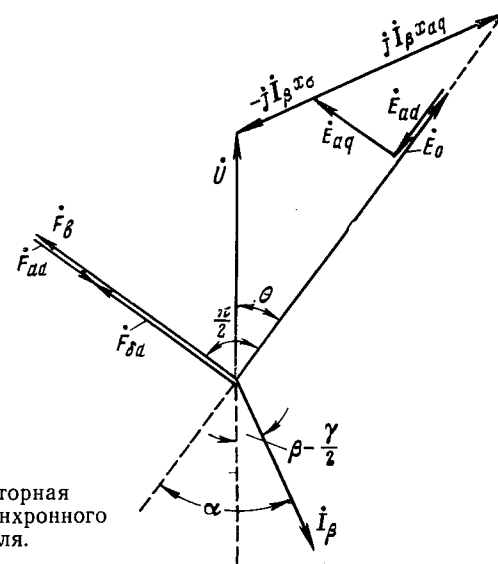


Рис. 2. Векторная диаграмма синхронного двигателя.

Для действующего значения первой гармоники тока имеем:

$$I_{\beta} = \frac{I_{m\beta}}{\sqrt{2}} \quad \text{или} \quad I_{\beta} = \zeta(\gamma) I_{d\beta}, \quad (2)$$

характера нагрузки на валу двигателя. Синхронный двигатель питается от источника постоянного тока где

$$\zeta(\gamma) = \frac{2}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{\frac{[\cos \gamma + \cos 120^\circ - \cos (120^\circ + \gamma) - 1]^2 + [\sin \gamma + \sin 120^\circ - \sin (120^\circ + \gamma)]^2}{\gamma^2}}.$$

через зависимый трехфазный мостовой инвертор (рис. 1). Для ясности выводов и простоты количественного анализа исследуется режим работы при катодной индуктивности $L_d = \infty$.

При вращении возбужденной синхронной машины в ее статорных обмотках наводятся трехфазные э. д. с. Управляемые вентили дают возможность пропускать в обмотки ток, направленный встречно э. д. с., в результате чего синхронная машина потребляет мощность из сети и развивает двигательный момент. Сеточные цепи вентилей, формирующие отпирающие импульсы, могут питаться по двум принципиальным схемам: непосредственно от возбужденной синхронной машины или от вспомогательной маломощной синхронной машины, расположенной на одном валу с двигателем.

При катодной индуктивности $L_d = \infty$ фазный ток двигателя изменяется только в период коммутации вентилей. По обмотке якоря протекает прерывистый ток с продолжительностью импульса $120^\circ + \gamma$, где γ — угол коммутации вентилей.

Если предположить, что за время коммутации ток изменяется линейно, то, разложив в ряд Фурье кривую тока $I_{d\beta}$, получим амплитуду первой гармоники

Изменение $\zeta(\gamma)$ при различных углах коммутации незначительно, поэтому можно принять:

$$\zeta(\gamma) = 0,78. \quad (2a)$$

Первая гармоника фазного тока отстает от фазного напряжения¹ на угол $\left[180 - \left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)\right]$ (рис. 2), где β — угол отпираания вентилей, отсчитываемый от точки пересечения отрицательных участков синусоид фазных напряжений. При питании сеточных цепей вентилей по схеме рис. 1 угол β непосредственно задается устройством сеточного управления (УСУ). При питании этих цепей от маломощной синхронной машины задаваемым углом будет угол $\alpha = \theta + \left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)$.

Проектируя векторы напряжений на направление вектора э. д. с. E_0 , находим фазное напряжение обмотки статора

$$U = \frac{E_0 - x_d I_{\beta} \sin \left[\theta + \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \right]}{\cos \theta}, \quad (3)$$

¹ Каганов И. Л., Электронные и ионные преобразователи, т. III., Госэнергоиздат, 1957.

$$I_{m\beta} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{[\cos \gamma + \cos 120^\circ - \cos (120^\circ + \gamma) - 1]^2 + [\sin \gamma + \sin 120^\circ - \sin (120^\circ + \gamma)]^2}{\gamma^2}} I_{d\beta}. \quad (1)$$

где E_0 — э. д. с. холостого хода двигателя;

x_d — индуктивное сопротивление по продольной оси,

$$x_d = x_{ad} + x_\sigma;$$

x_{ad} — индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси;

x_σ — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря;

θ — угол между векторами напряжения и э. д. с. холостого хода (угол нагрузки).

Постоянное напряжение, прикладываемое к трехфазному мостовому зависимому инвертору, и ток в нем определяются известными уравнениями:

$$U_{d\beta} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{2} U \cos \beta + \frac{3}{\pi} I_{d\beta} x_a + 2\Delta U_a; \quad (4)$$

$$I_{d\beta} = \frac{\sqrt{6}}{2} \frac{U}{x_a} [\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta], \quad (5)$$

где x_a — индуктивное сопротивление фазы обмотки статора, ограничивающее ток короткого замыкания при коммутации вентилей, которое для роторов с неявно выраженными полюсами или с пусковой короткозамкнутой обмоткой можно практически считать равным индуктивному сопротивлению рассеяния;

ΔU_a — падение напряжения в дуге вентилей.

Решая уравнения (4) и (5) совместно, найдем ток статора, приняв $x_a = x_\sigma$:

$$I_{d\beta} = \frac{U_{d\beta} - 2\Delta U_a}{\frac{3}{\pi} x_\sigma \frac{\cos(\beta - \gamma) + \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta}}. \quad (6)$$

Уравнение (6) при различных значениях параметра β представляет семейство кривых, связывающих ток нагрузки $I_{d\beta}$ с углом коммутации γ (см. табл. 1 приложения), где

$$\frac{I_{d\beta}}{I_k} = \frac{\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma) + \cos \beta}, \quad I_k = \frac{U_{d\beta} - 2\Delta U_a}{\frac{3}{\pi} x_\sigma}.$$

С учетом (3) уравнение (4) переписывается так:

$$U_{d\beta} - 2\Delta U_a = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{E_0 \cos \beta}{\cos \theta} + I_{d\beta} \left\{ \frac{3}{\pi} x_\sigma - \frac{3\sqrt{6}}{\pi} x'_d \frac{\cos \beta \sin \left[\theta + \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \right]}{\cos \theta} \right\}, \quad (7)$$

где

$$x'_d = \zeta(\gamma) x_d.$$

Примем:

$$x_\sigma = 2\pi f L'_\sigma = C_1 L_\sigma n; \quad (8)$$

$$x'_d = C_1 L_d n; \quad (9)$$

$$E_0 = C_e \Phi_0 n, \quad (10)$$

где n — скорость вращения ротора двигателя, об/мин;

$$C_1 = \frac{2\pi p}{60}; \quad C_e = \frac{4,44 p}{60} \omega k_w;$$

$$L'_d = \zeta(\gamma) L_d,$$

ω ; k_w — число витков и обмоточный коэффициент обмотки якоря;

p — число пар полюсов.

Подставляя уравнения (8)–(10) в (7), находим выражение для скоростной характеристики двигателя:

$$n = \frac{U_{d\beta} - \frac{3\sqrt{6}}{\pi} C_e \Phi_0 \frac{\cos \beta}{\cos \theta} + I_{d\beta} C_1 \times}{-2\Delta U_a} \times \left\{ \frac{3}{\pi} L_\sigma - \frac{3\sqrt{6}}{\pi} L'_d \frac{\cos \beta \sin \left[\theta + \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \right]}{\cos \theta} \right\}. \quad (11)$$

Из векторной диаграммы (рис. 2) можно установить связь между углом нагрузки θ и углом коммутации γ :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\cos \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right)}{\sin \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) + \frac{2x_\sigma}{\sqrt{6} x'_d [\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta]}}. \quad (12)$$

В табл. 2 (см. приложение) по уравнению (12) рассчитаны значения угла нагрузки θ в зависимости от угла коммутации γ при различных значениях β для случая, когда $\frac{x_\sigma}{x'_d} = \frac{x_\sigma}{x_q \zeta(\gamma)} = 0,1$.

Таким образом, методика расчета скоростной характеристики двигателя сводится к следующему.

а) Для тока нагрузки $I_{d\beta}$ при данном угле опережения β из семейства (6) находится угол коммутации γ .

б) Далее из (12) определяется угол нагрузки θ и по уравнению (11) рассчитывается скоростная характеристика двигателя.

Следует заметить, что, как видно из векторной диаграммы (рис. 2) и уравнения (11), ток статора намагничивает машину и фаза его по отношению к выходному напряжению инвертора является опережающей, т. е. возникает режим работы «перевозбужденного» синхронного двигателя.

Пренебрегая в уравнении (11) падением напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния по сравнению с падением напряжения на сопротивлении x'_d и учитывая уравнение (6), получим для скоростной характеристики двигателя выражение

$$n = \frac{U_{d\beta} - 2\Delta U_a}{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} C_e \Phi_0 \cos \beta} \left\{ \cos \theta + \frac{\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma) + \cos \beta} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{6} \frac{L'_d}{L_\sigma} \cos \beta \sin \left[\theta + \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \right] \right\}.$$

Это уравнение в упрощенном виде переписывается так: $n = n_0 \cos \theta + \Delta n$, что указывает на неустойчивость механической характеристики двигателя при неизменности намагничивания обмотки возбуждения. Указанная неустойчивость обусловлена размагничивающим действием тока нагрузки по продольной оси. Если результирующая намагничивающая сила по продольной оси постоянна и равна н. с. обмотки возбуждения при холостом ходе $F_{в0}$, то механическая характеристика будет иметь отрицательную жесткость за счет коммутационного падения напряжения и падения напряжения в дуге вентилей.

В этом случае н. с. возбуждения, как видно из рис. 2, должна изменяться по закону:

$$F_{\text{в}} = F_{\text{в0}} + F_{\text{ад}} = F_{\text{в0}} + k_d C_F \sin \left[\theta + \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \right] I_{\text{ад}}, \quad (12a)$$

где k_d — коэффициент приведения продольной н. с. якоря к н. с. обмотки возбуждения.

Требуемое увеличение н. с. обмотки возбуждения, необходимое для преодоления размагничивающего действия тока нагрузки по продольной оси, равно:

$$\frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{в0}}} = 1 + k \sin \left[\theta + \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \right] I_{\text{ад}}, \quad (12б)$$

где

$$k = \frac{2 \cdot 7 \zeta(\gamma) k_d \omega k_{\omega}}{I_{\text{в0}} \omega_{\text{в}}};$$

где $I_{\text{в0}}$ — ток возбуждения холостого хода.

Кривые изменения $\sin \left[\theta + \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \right]$ в зависимости от угла коммутации γ приведены на рис. 3 (см. приложение табл. 3).

Как показывают указанные кривые, начиная со сравнительно небольших нагрузок ($\gamma > 10$) ток возбуждения должен расти пропорционально току нагрузки.

Рассмотрим предельный режим работы системы. Зависимый инвертор может нагружаться током $I_{\text{ад}}$, не превышающим величины $I_{\text{адмакс}}$, при которой послекоммутационный угол δ при заданном угле опережения β принимает минимально возможное значение $\delta_{\text{мин}}$, необходимое для восстановления запирающих свойств сеток в вентиллях. При $\delta < \delta_{\text{мин}}$ сетка не успевает перекрыть очередной вентиль, выходящий из работы, и инвертор выпадает из режима.

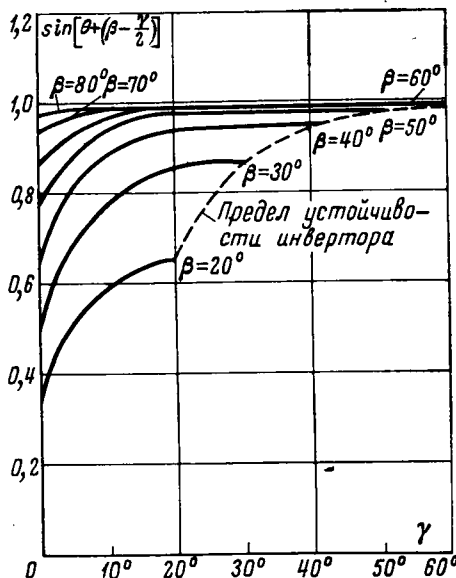


Рис. 3. К закону изменения тока возбуждения.

Для предельного тока нагрузки при пренебрежении падением напряжения в дуге вентилей справедливо выражение

$$I_{\text{адмакс}} = \frac{\sqrt{6} U_{\text{п}}}{2 x_{\sigma}} (\cos \delta_{\text{мин}} - \cos \beta), \quad (13)$$

где $U_{\text{п}}$ — фазное напряжение в предельном режиме.

Для рассматриваемого режима уравнение (4) примет вид:

$$U_{\text{ад}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{2} U_{\text{п}} \cos \beta + \frac{3}{\pi} x_{\sigma} I_{\text{адмакс}}. \quad (14)$$

Решая систему уравнений (13) и (14), найдем предельно возможную в отношении безопасной работы инвертора величину тока

$$I_{\text{адмакс}} = \frac{U_{\text{ад}}}{\frac{3}{\pi} x_{\sigma}} \frac{\cos \delta_{\text{мин}} - \cos \beta}{\cos \delta_{\text{мин}} + \cos \beta}. \quad (15)$$

$$U_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ад}}}{\frac{3\sqrt{6}}{2\pi} (\cos \delta_{\text{мин}} - \cos \beta)}. \quad (16)$$

Для предельного режима $\beta = \gamma + \delta_{\text{мин}}$, следовательно, угол между векторами фазных напряжения и тока (рис. 2) равен

$$\left[180^\circ - \left(\frac{\beta + \delta_{\text{мин}}}{2} \right) \right].$$

Через инвертор будет передаваться предельная, возможная по условиям коммутации, электромагнитная мощность

$$P_{\text{п}} = 3 U_{\text{п}} I_{\text{адмакс}} \cos \left(\frac{\beta + \delta_{\text{мин}}}{2} \right) = C_1 \frac{U_{\text{ад}}^2}{x_{\sigma}} \frac{\cos \left(\frac{\beta + \delta_{\text{мин}}}{2} \right) (\cos \delta_{\text{мин}} - \cos \beta)}{(\cos \delta_{\text{мин}} + \cos \beta)^2}, \quad (17)$$

где коэффициент $C_1 = \frac{2\pi^2 \zeta(\gamma)}{3\sqrt{6}}$. С учетом (2a) можно считать $C_1 = 2,1$.

Так как постоянное напряжение, приложенное к инвертору, равно его противо-э. д. с. при холостом ходе

$$U_{\text{ад}} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_0 \cos \beta, \quad (17a)$$

где U_0 — фазное напряжение холостого хода синхронной машины, то выражение для предельной мощности (17) можно записать так:

$$P_{\text{п}} = C_2 \frac{U_0^2 \cos \beta \cos \left(\frac{\beta + \delta_{\text{мин}}}{2} \right) (\cos \delta_{\text{мин}} - \cos \beta)}{x_{\sigma} (\cos \delta_{\text{мин}} + \cos \beta)^2}, \quad (18)$$

где

$$C_2 = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \right)^2 C = 6\sqrt{6} \zeta(\gamma) = 11,5.$$

Исследуя уравнение (18) на максимум по углу β для случая идеальных вентилей ($\delta_{\text{макс}} = 0$), находим, что максимум предельной мощности, равный:

$$P_{\text{п.макс}} = 0,58 \frac{U_0^2}{x_{\sigma}}, \quad (19)$$

имеет место при угле опережения $\beta = 62^\circ$.

Кривые предельных мощностей, выраженных в долях максимальной, для различных β и при

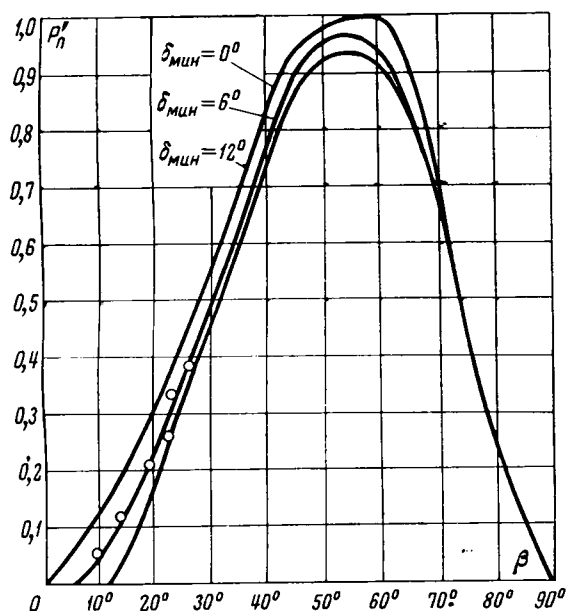


Рис. 4. Мощность инвертора в предельных режимах (кружками обозначены опытные точки).

$\delta_{\min} \neq 0$ приведены на рис. 4 (см. приложение, табл. 4).

Из уравнения (18) следует, что при заданном угле β и жесткой механической характеристике двигателя предельная мощность при различных скоростях холостого хода (различных токах возбуждения холостого хода) обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению рассеяния

$$x_c = C_1 L_s n,$$

т. е. обратно пропорциональна скорости вращения ротора двигателя. На рис. 4 отмечены также опытные точки кривой предельной мощности для синхронной машины, имеющей данные:

$$\begin{aligned} U_0 &= 127 \text{ в}; & n_c &= 1500 \text{ об/мин}; \\ I_n &= 15,6 \text{ а}; & x_c &= 1 \text{ ом (для синхронной скорости)}. \\ P_n &= 4,5 \text{ кВт}; \end{aligned}$$

На рис. 5,а построены механические характеристики указанной машины, снятые опытным путем при питании ее через трехфазный мостовой зависимый инвертор, выполненный на базе ртутных тиристорных ТР1-6-15 с номинальным током 6,5 а. На рис. 5,б приведены осциллограммы напряжения на выходе устройства сеточного управления (отпирающий импульсы) $U_{\text{и}}$, а также линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} и тока в одной из фаз двигателя в режиме холостого хода (осц. слева) и при нагрузке (осц. справа).

Выводы. 1. Рассматриваемая система электропривода обладает достаточно высокими регулировочными свойствами, обеспечивающими двухзонное плавное регулирование скорости в широком диапазоне.

2. При выполнении закона регулирования тока возбуждения синхронного двигателя, определяемо-

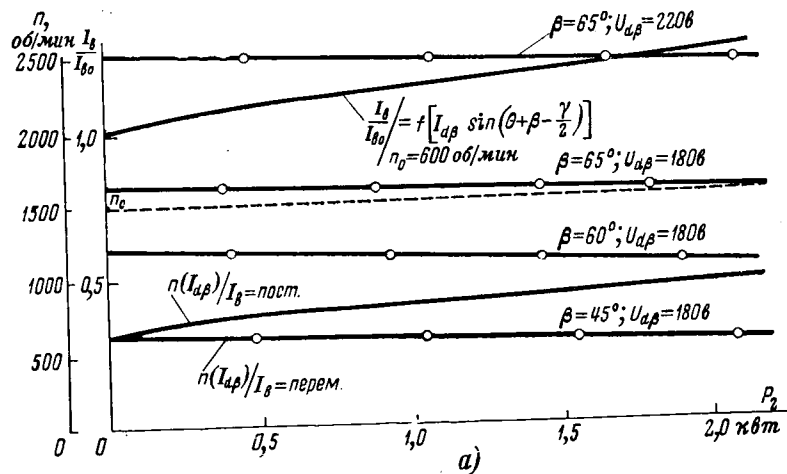


Рис. 5.

а — механические характеристики синхронного двигателя, питаемого от мостового зависимого инвертора при двухзонном регулировании; б — осциллограммы линейных напряжений фазного тока двигателя и напряжения отпирающего импульса инвертора для режима холостого хода (слева) и при нагрузке (справа).

го характером нагрузки, система обеспечивает статическую устойчивость во всем диапазоне регулирования скорости.

3. Система может найти применение в качестве привода для механизмов, требующих глубокого регулирования скорости на базе крупных быстроходных синхронных машин, особенно с применением полупроводниковых схем.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

| β | γ | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
|---------|----------|-------|------|------|------|------|-----|
| 10° | 0,01 | — | — | — | — | — | — |
| 20° | 0,02 | 0,03 | — | — | — | — | — |
| 30° | 0,04 | 0,06 | 0,07 | — | — | — | — |
| 40° | 0,06 | 0,093 | 0,12 | 0,13 | — | — | — |
| 50° | 0,092 | 0,15 | 0,19 | 0,21 | 0,22 | — | — |
| 60° | 0,12 | 0,21 | 0,27 | 0,30 | 0,33 | 0,33 | — |
| 70° | 0,19 | 0,30 | 0,39 | 0,44 | 0,47 | 0,49 | — |
| 80° | 0,33 | 0,50 | 0,58 | 0,64 | 0,68 | 0,70 | — |

Таблица 2 или

| $\beta \backslash \gamma$ | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 20° | 22,0 | 31,0 | — | — | — | — |
| 30° | 27,5 | 39,0 | 45,0 | — | — | — |
| 40° | 29,5 | 40,5 | 46,5 | 52,5 | — | — |
| 50° | 26,5 | 37,0 | 44,0 | 48,5 | 53,5 | — |
| 60° | 22,0 | 30,5 | 37,0 | 42,5 | 47,0 | 52,0 |
| 70° | 19,5 | 24,5 | 30,5 | 35,0 | 40,0 | 45,0 |
| 80° | 13,0 | 17,0 | 22,0 | 26,5 | 31,5 | 37,0 |

Таблица 3

| $\beta \backslash \gamma$ | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
|---------------------------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 20° | 0,34 | 0,60 | 0,66 | — | — | — | — |
| 30° | 0,50 | 0,79 | 0,86 | 0,87 | — | — | — |
| 40° | 0,64 | 0,90 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | — | — |
| 50° | 0,77 | 0,95 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | — |
| 60° | 0,87 | 0,97 | 0,985 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 70° | 0,94 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 80° | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |

К определению $\lg \theta$.

Угол опережения фазного тока двигателя относительно фазного напряжения

$$\beta - \frac{\gamma}{2} = \omega.$$

Из векторной диаграммы видно, что

$$U \sin \omega + I_{d\beta} x'_q = U \cos \omega \lg(\theta + \omega)$$

$$\lg(\theta + \omega) = \lg \omega + \frac{I_{d\beta} x'_q}{U \cos \omega};$$

$$\frac{\lg \theta + \lg \omega}{1 - \lg \theta \lg \omega} = \lg \omega + A,$$

где

$$A = \frac{I_{d\beta} x'_q}{U \cos \omega}.$$

Решив полученное уравнение относительно $\lg \theta$, получим:

$$\begin{aligned} \lg \theta &= \frac{A}{1 + \lg^2 \omega + A \lg \omega} = \frac{\frac{I_{d\beta} x'_q}{U \cos \omega}}{1 + \frac{I_{d\beta}^2 x_q'^2 \sin^2 \omega}{\cos^2 \omega} + \frac{I_{d\beta} x'_q \sin \omega}{U \cos^2 \omega}} = \\ &= \frac{\cos \omega}{\frac{U}{I_{d\beta} x'_q} + \sin \omega}. \end{aligned}$$

Подставив в полученное выражение $I_{d\beta}$ из (5), найдем:

$$\lg \theta = \frac{\cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)}{\sin\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) + \frac{2x_\sigma}{\sqrt{6}x'_q [\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta]}}.$$

Таблица 4

| $\beta \backslash \delta$ | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° |
|---------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| 0° | 0,19 | 0,315 | 0,56 | 0,85 | 0,99 | 0,99 | 0,72 | 0,285 |
| 6° | 0,056 | 0,23 | 0,49 | 0,77 | 0,96 | 0,94 | 0,67 | 0,265 |
| 12° | — | 0,175 | 0,46 | 0,75 | 0,92 | 0,89 | 0,66 | 0,26 |

[17.4.1965]



УДК 621.3.078

О комплексной автоматизации промышленных электроприводов

Кандидат техн. наук, доц. Б. Б. ВОРОНЕЦКИЙ

Москва

Благодаря созданию быстродействующих управляющих вычислительных машин, обладающих широкими возможностями по приему и переработке информации, стало возможным построение сложных кибернетических систем для управления не только отдельными агрегатами, но и цехами и заводами в целом.

Среди кибернетических систем, нашедших у нас в Союзе к настоящему времени промышленное применение, могут быть отмечены системы комплексного управления химическими процессами, комплексная система управления ходом доменного процесса и система комплексной автоматизации блюмингов-автоматов.

Опыт показывает, что осуществление задачи создания комплексных систем автоматизации сложных промышленных объектов должно идти в трех следующих друг за другом направлениях:

1. Аналитическое конструирование системы управления, что однозначно с задачей определения алгоритма управляющих устройств [Л. 1].

2. Выбор и физическое конструирование средств, предназначенных для реализации найденных алгоритмов.

3. Анализ динамических свойств созданной системы управления (устойчивость и точность) и синтез корректирующих устройств.

Рассмотрим пути и методы решения задач этих трех направлений.

Аналитическое конструирование системы управления. Эти задачи подразделяются на две четко разграниченные группы:

1. К первой группе относятся задачи по обеспечению организации производственного процесса (планирование, диспетчеризация, учет заказов, рас-

пределение потока продукции, регулирование интенсивности производства и т. п.). Эти задачи имеют косвенную связь с управлением технологическим процессом и прямого воздействия на его регулирование не оказывают.

2. Вторую группу составляют задачи по обеспечению ведения технологического процесса (регулирование параметров технологического процесса, как-то: скорости электроприводов, температуры, давления, формирование оптимальных переходных процессов в системе и т. п.). Эти задачи имеют прямую, непосредственную связь с управлением технологическим процессом и оказывают прямое воздействие на его регулирование.

Для удобства математического анализа при аналитическом конструировании систем управления целесообразно все виды рассматриваемых технологических процессов, исходя из их математического описания, разделить на два резко не разграниченных класса.

Первый класс охватывает технологические процессы, которые можно объединить понятием преимущественно химического преобразования продукта. Вопросы динамики электроприводов здесь имеют второстепенное значение.

Эти процессы обычно описываются алгебраическими уравнениями. В таких процессах, как правило, исходными являются не сами параметры процессов, а их статистические характеристики.

Второй класс охватывает технологические процессы, которые характеризуются преимущественно физическими преобразованиями продукта и связаны с механическими перемещениями как основными формами процесса. Вопросы динамики электроприводов здесь имеют решающее значение. Такого рода процессы описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений.

Поскольку вопросы комплексной автоматизации электроприводов относятся к второму классу технологических процессов, то решение задачи аналитического конструирования их систем управления рассмотрим подробнее. При этом отметим, что основной и важнейшей задачей комплексной автоматизации современных электроприводов является максимально возможное приближение ведения технологического процесса к оптимальным режимам. В этой связи нас в дальнейшем будут интересовать не вообще алгоритмы процессов, а алгоритмы только оптимальных процессов.

Решение задачи аналитического конструирования системы оптимального управления электроприводом требует нахождения такой функции, при которой управляющее воздействие на основании информации о состоянии объекта имело бы оптимальное значение [Л. 1—3], т. е.

$$u = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где u — управляющее воздействие (например, напряжение на якоре двигателя в системе УРВ—Д);

x_1, x_2, \dots, x_n — фазовые координаты системы (например, путь, скорость, ток и др.).

Для определения этой функции необходимо решить вариационную задачу применительно к про-

цессу, описываемому системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, u). \quad (2)$$

Известно [Л. 5 и 6], что в электроприводе, как правило, на фазовые координаты и управляющее воздействие накладываются ограничения вида

$$\begin{cases} |u| \leq |u_m|; \\ |x_i| \leq |x_m|, \end{cases} \quad (3)$$

где u_m и x_m — максимально допустимые значения управляющих воздействий и фазовых координат.

За критерий оптимальности в большинстве случаев принимается время t , т. е. решается задача о максимальном быстродействии привода. Эта задача может быть сформулирована следующим образом: требуется, чтобы привод совершил заданную работу в минимальное время либо заданное перемещение в минимальное время при соблюдении соответствующих ограничений.

Решение рассматриваемой вариационной задачи проще всего осуществить путем использования математического аппарата «принципа максимума».

Для этого выбираются вспомогательные функции времени $\psi_1(t)$, $\psi_2(t)$, $\psi_3(t)$, которые вводятся следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\psi_k}{dt} = - \sum_{k=1}^3 \frac{\partial f_k(x_1, x_2, x_3, u)}{\partial x_i} \psi_k, \quad (4)$$

где $k=1, 2, 3$.

Затем составляется функция H вида

$$H(\Psi, x, u) = \sum_{k=1}^3 \psi_k(t) f_k(x_1, x_2, x_3, u). \quad (5)$$

Функция H (как функция u) должна принимать максимальное положительное или равное нулю значение и сохранять его неизменным (равным некоторой величине — ψ_0) на всем отрезке времени, где осуществляется оптимальное управление.

Результатом решения является алгоритм вида (1), аналитически характеризующий систему управления.

Конструирования средств управления. На основании полученного алгоритма может быть определен необходимый объем информации, количество и вид рецепторов — датчиков технологических параметров, а по найденному выражению (1) можно строить систему управления с применением указанных датчиков и других средств управления.

При этом необходимо иметь в виду, что комплексная автоматизация, охватывающая не один привод, а, как правило, несколько десятков электроприводов, требует при реализации даже самых простых законов управления создания сложных вычислительных устройств, которые в большинстве случаев по объему оборудования и его стоимости не уступают универсальным вычислительным машинам (УВМ).

В этой связи надо считать целесообразным при комплексной автоматизации ориентироваться на

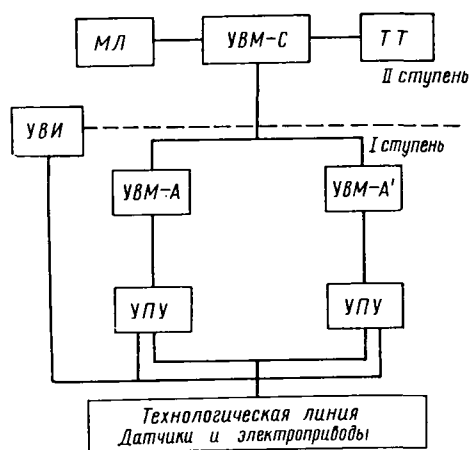


Рис. 1. Структурная схема управляющего вычислительного комплекса.

УВМ—А и УВМ—А' — управляющие вычислительные машины первой ступени; УВМ—С — управляющая вычислительная машина второй ступени; УПУ — универсальное преобразующее устройство; УВИ — устройство ввода информации; МЛ — магнитная лента («память»); ТТ — телетайпы.

УВМ, имеющие разветвленную систему связи, для приема, преобразования и выдачи информации и обладающие возможностью работать в реальном масштабе времени, т. е. располагающие развитой системой прерывания [Л. 6]. К такого рода машинам относится машина ВНИИЭМ-3, на базе которой создан кибернетический управляющий комплекс блюминга-автомата 1300.

На базе аналогичной машины ВНИИЭМ-1 осуществлена система комплексной автоматизации хода доменной печи.

На рис. 1 приведена структурная схема управляющего вычислительного комплекса, созданного для управления технологическим объектом и примененного на обжимных прокатных станах.

Система в соответствии с выполняемыми функциями управления и регулирования построена в две ступени. Одна из них (УВМ—С) решает вопросы организации управления производством (планирование, учет, диспетчеризация и т. д.). Вторая ступень (УВМ—А и А') непосредственно управляет технологическим процессом объекта (обеспечивает оптимальное протекание процесса).

Информация, необходимая для управления объектом и управления процессом, вводится от соответствующих датчиков и специальных устройств ввода через многоканальные универсальные преобразующие устройства (УПУ) в вычислительные машины обеих ступеней.

Для защиты машин от высокого потенциала электроприводов, а также для защиты от помех и влияния замкнутых контуров в схеме комплекса должна быть предусмотрена гальваническая развязка цепей датчиков и цепей управляющей машины.

Повышенная надежность и безотказность работы комплекса обеспечивается посредством внутренних схемных и конструктивных решений самих вычислительных машин (дублирование основных узлов, применение помехозащищенных кодов, монтаж

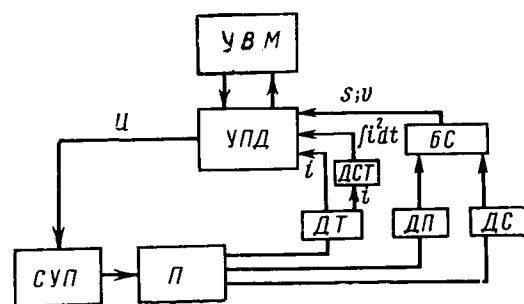


Рис. 2. Типовая схема управления электроприводом от УВМ.

П — привод; ДП — датчик положения механизма; ДСТ — датчик среднеквадратичного тока; ДТ — датчик тока; ДС — датчик скорости; БС — блок связи.

повышенной надежности и др.) и внешних схемных решений управляющего комплекса (вычислительные машины — дублиры на ступени управления процессом, обеспечивающие обмен информацией, автоматическое определение сбоев в машине, автоматическую взаимную передачу функций между машинами и т. д.).

Вычислительные машины УВМ—А и УВМ—А' ступени управления технологическим процессом включены в замкнутый контур управления электроприводами. На рис. 2 представлена типовая схема управления электроприводом от УВМ.

В качестве датчика положения механизма привода (ДП) может быть использован 10-разрядный индукционный преобразователь «вал — цифра» в V-коде.

Для обеспечения оптимальных законов управления приводом с учетом нагрева якоря двигателя необходимо иметь информацию о нагрузке двигателя. Такую информацию можно получить от датчика среднеквадратичного тока (ДС), построенного на базе элементов Холла.

Для получения информации о скорости перемещения исполнительного механизма могут быть применены в качестве датчика скорости ДС дискретные индукционные тахометры.

Указанные датчики установлены на блюминге-автомате 1300.

Таким образом, рассмотренная двухступенчатая, рассчитанная на применение нескольких управляющих машин, система может быть признана универсальной и ее можно рекомендовать для обеспечения комплексной автоматизации промышленных электроприводов.

Анализ динамики системы и синтез корректирующих устройств. Особенность рассматриваемой комплексной системы автоматизации электроприводов состоит в том, что работа отдельных автономных систем ее составляющих жестко связана во времени через управляющую вычислительную машину.

Эту особенность следует учитывать при расчете динамики системы управления электроприводами в целом.

Алгоритмы управления механизмами, в том числе и оптимальные, служат для формирования управляющих воздействий при разгоне и торможении приводов механизмов.

До момента окончания машиной отработки система управления каждым механизмом является разомкнутой по положению. При подходе к заданному положению система управления каждого механизма замыкается (по положению). Для обеспечения заданной точности и формирования переходного процесса должен быть проведен синтез корректирующих устройств и выявлена необходимая величина периода обновления информации в системе управления электроприводами.

Для упрощения общей задачи синтеза следует при сохранении существенных факторов предварительно пренебречь нелинейностями в системах управления электроприводами механизмов, учитывая эффект квантования сигнала по уровню и по времени, возникающий из-за наличия УВМ в структуре управления.

Следующим шагом исследования является подробный учет нелинейностей и учет взаимного влияния механизмов.

Для решения поставленной выше задачи синтеза многодвигательной и многомашинной цифровой автоматической системы целесообразно применить математический аппарат дискретного преобразования Лапласа в его Z - и W -преобразованиях.

На рис. 3 приведена структурная схема цифровой автоматической системы в случае пренебрежения эффектом квантования сигнала по уровню (T — период смены информации).

Разомкнутая импульсная система имеет передаточную функцию $W^*(q, \varepsilon)$, полученную применением дискретного преобразования Лапласа [Л. 4]. Решение задачи анализа и синтеза наиболее просто проводится при использовании метода логарифмических характеристик для цифровых систем, примененного на основе W -преобразования:

$$q = \text{Ln} \frac{1 + \frac{T}{2} W}{1 - \frac{T}{2} W}. \quad (6)$$

Преимущество W -преобразования состоит в том, что оно конформно отображает область определения передаточной функции на левую полуплоскость шириной 2π плоскости q на всю левую полупло-

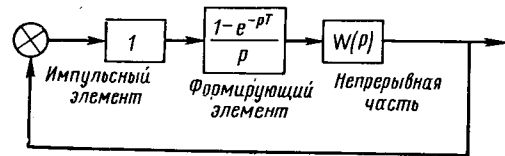


Рис. 3. Структурная схема цифровой автоматической системы.

кость W . При этом частотная характеристика импульсной системы становится однозначной функцией размерной псевдо частоты $W^*(q = jW^*)$ и возможно применение метода логарифмических характеристик.

В связи с этим анализ устойчивости подобной системы должен проводиться методом логарифмических характеристик, определение которых целесообразно проводить по упрощенным методам.

Необходимо отметить, что при учете влияния на динамику системы квантования сигнала по уровню и по времени возможно возникновение периодических режимов. В этом случае целесообразно параметры периодических режимов определять методом, подобным методу гармонического баланса с использованием логарифмических характеристик.

Рассмотренные в данной статье вопросы являются постановочными, базирующимися на первых результатах работ, которые проводятся коллективами специалистов ВНИИэлектропривод и ВНИИЭМ в области комплексной автоматизации промышленных электроприводов.

Литература

1. Летов А. М., Аналитическое конструирование регуляторов, «Автоматика и телемеханика», 1961, № 4—6.
2. Поитрягии Л. С., Математическая теория оптимальных процессов, Физматгиз, 1961.
3. Фельдбаум А. А., Основы теории оптимальных автоматических систем, Физматгиз, 1963.
4. Цыпкин Я. З., Теория линейных импульсных систем, Физматгиз, 1963.
5. Воронежский Б. Б. и Святославский В. А., Оптимальные режимы работы главного привода блужинга, «Электричество», 1964, № 7.
6. Каган Б. М., Общие вопросы построения управляющих вычислительных машин, «Электричество», 1962, № 10.

[6.5.1965]



Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности

Доктор техн. наук В. Г. ХОЛМСКИЙ

Киевский политехнический институт

Введение. Замкнутая электрическая сеть, для всех участков которой справедливо соотношение $\frac{x_i}{r_i} = \text{пост.}$, в свое время была названа электрически однородной [Л. 1 и 2]. В такой сети возникает благоприятное потокораспределение, обеспечивающее наименьшие потери активной и реактивной мощностей.

В существующих и сооружаемых сетях всегда имеется некоторая степень неоднородности. Она особенно велика в смешанных сетях с кабельными и воздушными линиями и в сетях замкнутых через трансформаторы или автотрансформаторы.

При высокой степени неоднородности сети потокораспределение в ней получается значительно менее благоприятным, чем в сети с такими же активными сопротивлениями, но лишенной неоднородности. Улучшение потокораспределения в неоднородных сетях может быть достигнуто следующими путями:

введением в контуры сети дополнительных э. д. с. с помощью вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ), компенсирующих влияние неоднородности; снижением неоднородности сети за счет установок продольной компенсации (УПК), емкостной или индуктивной;

разрезанием сети в правильно выбранных точках.

В результате во всех случаях уменьшаются потери активной мощности и разгружаются перегруженные участки. Характер изменения потерь реактивной мощности и режима напряжений зависит от типа примененных дополнительных устройств и схем их включения.

Пределом улучшения может служить потокораспределение, названное в [Л. 1 и 2] экономическим. Это потокораспределение возникло в данной сети, если бы последняя обладала только активными сопротивлениями.

Обычно в сетях осуществляется не точное экономическое потокораспределение, а *оптимальное*, т. е. такое, которое наиболее благоприятно для данной сети в рассматриваемых условиях. При этом следует различать два вида задачи.

Эксплуатационная задача. Оптимальным явится потокораспределение, обеспечивающее относительный минимум потерь активной мощности при использовании существующих средств компенсации. В зависимости от состава этих средств требуется определить: установку ответвлений ВДТ и трансформаторов связи, изменение коммутационных схем УПК, если это допускается устройством, выбор точек разрезания контуров. Перестановка ответвлений нерегулируемых трансформаторов связи и перемещение точек разрезания не являются оперативными средствами оптимизации. Соответствующие решения (они всегда будут компромиссными) приходится принимать на сравнительно длительный период времени путем анализа серии ха-

рактерных режимов, чтобы обеспечить минимум потерь энергии за этот период.

Проектная задача. Оптимальным будет потокораспределение, обеспечивающее минимум суммарных расчетных затрат на покрытие потерь мощности и энергии и на дополнительные устройства.

Определению подлежат: тип дополнительных устройств, их размещение и пределы регулирования, значения потерь активной и реактивной мощности в сети до и после оптимизации. Поскольку прямая оптимизация расчетных затрат является весьма громоздкой, вопрос приходится решать сравнением ряда вариантов.

Ниже рассмотрены приближенные методы расчета, позволяющие непосредственно решить эксплуатационную задачу и подготовить основные данные для решения проектной задачи.

Все расчеты выполняются в мощностях. Предполагается, что читателю известны расчеты естественного и экономического потокораспределений [Л. 2 и 3]. Оба вида потокораспределения целесообразно для рассматриваемой сети найти предварительно. Это позволяет заранее оценить возможности, а иногда и сразу выбрать пути оптимизации.

Оптимизация с помощью ВДТ. Создание точного экономического потокораспределения в многократно замкнутой электрической сети требует установки в каждом контуре вольтодобавочных трансформаторов с независимым регулированием продольной и поперечной составляющих э. д. с. Однако во многих случаях вполне удовлетворительные результаты могут быть получены при установке ВДТ только в части контуров. Зачастую при этом можно ограничиться установкой более простых трансформаторов, регулирующих модуль э. д. с. при неизменной ее фазе. В сетях, замкнутых через трансформаторы, последние могут быть использованы для создания и регулирования добавочной продольной э. д. с. При этом в ряде случаев потребуются установка ВДТ, дающих только поперечную э. д. с. Наконец, в этих же сетях при отсутствии ВДТ некоторая степень оптимизации может быть достигнута за счет правильного подбора ответвлений трансформаторов связи. Применяемая методика расчета должна обеспечивать возможность решения перечисленных вопросов.

Первый этап. Определение удельных уравнительных мощностей во всех ветвях, возникающих при включении в одном из контуров сети единичной продольной э. д. с.¹ Для расчета может быть применен любой из известных методов, например

¹ Ветвью в настоящей статье именуется электрическая связь между двумя узлами сети. Узлом считается общая точка двух и более контуров, т. е. в узле сходятся не менее чем три ветви. Ветвь может состоять из произвольного количества участков между точками включения отдельных нагрузок или источников энергии. В состав ветви могут также входить трансформаторные связи.

метод преобразования сети к одному контуру или составлению уравнений, выражающих второй закон Кирхгофа. Единичные э. д. с. поочередно вводятся при расчетах во все контуры, в которых намечается установка ВДТ.

Пусть в сети имеется 1, 2, 3, ..., l , ..., L ветвей и предполагается установка 1, 2, ..., k , ..., K вольтодобавочных агрегатов. Удельная уравнивательная мощность в l -й ветви, обусловленная включением k -й единичной э. д. с., будет:

$$\dot{S}_{kl} = p_{kl} + jq_{kl}.$$

Если в действительности рассматриваемой э. д. с. придать значение $\Delta \dot{E}_k = \Delta E_{ak} + j\Delta E_{pk}$, то уравнивательная мощность данной ветви приобретает значение

$$\dot{S}_{klv} = (p_{kl} + jq_{kl})(\Delta E_{ak} + j\Delta E_{pk}).$$

При этом активная и реактивная составляющие уравнивательной мощности соответственно равны:

$$P_{klv} = p_{kl}\Delta E_{ak} - q_{kl}\Delta E_{pk}; \quad (1)$$

$$Q_{klv} = q_{kl}\Delta E_{ak} + p_{kl}\Delta E_{pk}. \quad (2)$$

Результирующая уравнивательная мощность с учетом всех установленных ВДТ представится выражениями:

$$P_{lv} = \sum_{k=1}^{K} (p_{kl}\Delta E_{ak} - q_{kl}\Delta E_{pk}); \quad (3)$$

$$Q_{lv} = \sum_{k=1}^{K} (q_{kl}\Delta E_{ak} + p_{kl}\Delta E_{pk}). \quad (4)$$

Дальнейшие расчеты можно вести двумя путями, обеспечивающими различную степень точности. Рассмотрим сперва более точное решение.

Предположим, что данная ветвь состоит из n_l участков. Возьмем произвольный участок, обладающий активным сопротивлением r_{li} , по которому при естественном потокораспределении протекает мощность $\dot{S}_{li0} = P_{li0} + jQ_{li0}$. Суммарные мощности с учетом добавочных э. д. с. становятся равными:

$$P_{li} = P_{li0} + P_{lv} \quad \text{и} \quad Q_{li} = Q_{li0} + Q_{lv}.$$

Потери активной мощности на участке в отдельной ветви и во всей сети соответственно будут:

$$\Delta P_{li} = \frac{(P_{li}^2 + Q_{li}^2) r_{li}}{U_{ii}^2};$$

$$\Delta P_l = \sum_{i=1}^{n_l} \Delta P_{li} \quad \text{и} \quad \Delta P_c = \sum_{i=1}^{L} \Delta P_l.$$

Чтобы найти значения продольных и поперечных составляющих всех добавочных э. д. с., обеспечивающих оптимизацию потокораспределения, необходимо написать и решить систему из $2K$ уравнений вида

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Delta E_{aj}} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \Delta P_c}{\partial \Delta E_{pj}} = 0,$$

где индекс j является символом рассматриваемой э. д. с.

После подстановок и дифференцирования последние уравнения приводятся к следующему виду:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K} \Delta E_{ak} \sum_{l=1}^{L} r_l (p_{jl} p_{kl} + q_{jl} q_{kl}) - \\ & - \sum_{k=1}^{K} \Delta E_{pk} \sum_{l=1}^{L} r_l (p_{jl} q_{kl} - q_{jl} p_{kl}) = \\ & = - \sum_{l=1}^{L} p_{jl} \sum_{i=1}^{n_l} P_{li0} r_{li} - \sum_{l=1}^{L} q_{jl} \sum_{i=1}^{n_l} Q_{li0} r_{li}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K} \Delta E_{pk} \sum_{l=1}^{L} r_l (p_{jl} p_{kl} + q_{jl} q_{kl}) + \\ & + \sum_{k=1}^{K} \Delta E_{ak} \sum_{l=1}^{L} r_l (p_{jl} q_{kl} - q_{jl} p_{kl}) = \\ & = \sum_{l=1}^{L} q_{jl} \sum_{i=1}^{n_l} P_{li0} r_{li} - \sum_{l=1}^{L} p_{jl} \sum_{i=1}^{n_l} Q_{li0} r_{li}, \end{aligned} \quad (6)$$

где r_l — активное сопротивление произвольной ветви.

При значениях индексов $j=k$ в уравнениях (5) и (6) соответственно коэффициенты при ΔE_{pk} и ΔE_{ak} обращаются в нули.

В сетях с трансформаторными связями при отсутствии вольтодобавочных агрегатов оптимизацию приходится ограничивать использованием только продольной э. д. с., обеспечиваемой подбором ответвлений трансформаторов. При этом уравнение (6) отпадает, а уравнение (5) приобретает вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K} \Delta E_{ak} \sum_{l=1}^{L} r_l (p_{jl} p_{kl} + q_{jl} q_{kl}) = \\ & = - \sum_{l=1}^{L} p_{jl} \sum_{i=1}^{n_l} P_{li0} r_{li} - \sum_{l=1}^{L} q_{jl} \sum_{i=1}^{n_l} Q_{li0} r_{li}. \end{aligned} \quad (5a)$$

Продольная э. д. с., создаваемая в контуре, замыкающемся через трансформаторы, определяется выражением

$$\Delta E_{aj} = (1 - k_{T1} k_{T2} \dots) U_n, \quad (7)$$

где k_{T1} , k_{T2} и т. д. — коэффициенты трансформации всех трансформаторов, входящих в рассматриваемый контур;

U_n — номинальное напряжение той ступени трансформации, в которой приведены сопротивления всей сети.

Коэффициенты трансформации берутся с учетом принятого направления обхода контуров. Подбором ответвлений трансформаторов добиваются значений продольных составляющих э. д. с., близких к найденным согласно уравнению (5a).

Чтобы решения были приемлемы для всех режимов системы, необходимо иметь трансформаторы связи с регулированием напряжения под нагрузкой.

При решении проектных задач после определения теоретических значений всех дополнительных э. д. с. некоторые из них могут оказаться малыми. Такие э. д. с. целесообразно исключить и повторить расчет с меньшим количеством ВДТ. Поэтому при первоначальной наметке точек установки ВДТ их следует выбирать с некоторым «запасом».

В дальнейшем теоретические значения э. д. с. округляются в соответствии с пределами регулирования и дискретными значениями ответвлений трансформаторов, установленных в сети или намеченных к установке.

Для решения вопроса о замене всех или части ВДТ с независимым регулированием продольной и поперечной составляющих э. д. с. устройствами с постоянной фазой э. д. с. рассмотрим значения фазных углов э. д. с., полученных в результате решения уравнений (5) и (6). Фазный угол произвольной э. д. с. равен:

$$\beta_k = \arctg \frac{\Delta E_{pk}}{\Delta E_{ak}}. \quad (8)$$

Для ВДТ постоянной фазы необходимо принять схему включения, обеспечивающую угол, возможно близкий к найденному из выражения (8). Как известно, постоянные углы могут иметь значения в пределах от 0 до 360° со ступенями по 30°.

Для определенного режима работы сети обычно удается подобрать значения фазных углов ВДТ, достаточно близкие к экономическим, и потери в сети при этом увеличиваются незначительно. Затруднения могут возникнуть, если в разных режимах значения β_k будут резко различны.

Таким образом, могут быть выявлены один или несколько вариантов установки ВДТ. После этого производится расчет действительных значений уравнительной мощности согласно (3) и (4). Зная контуры, в которых включаются дополнительные э. д. с., и определив пределы регулирования, необходимо выбрать место установки ВДТ. При этом следует учитывать два основных положения [Л. 2]:

1. Наличие в контуре ВДТ приводит к тому, что одни ветви контура догружаются, а другие разгружаются. Если в пределах ветви имеется точка токораздела, то разгружаются и догружаются отдельные части ветви. Установка ВДТ в догружаемых линиях сети приводит к существенному возрастанию уровней напряжений, особенно если ВДТ имеет продольную э. д. с. При установке в разгружаемых линиях уровни напряжений снижаются. Поэтому, как правило, ВДТ следует устанавливать в догружаемых элементах. Чисто поперечные ВДТ оказывают меньшее влияние на режим напряжений и могут устанавливаться в любой части сети.

2. Перемещение ВДТ в пределах одной ветви практически не влияет на величину необходимой э. д. с., но в большой мере сказывается на величине проходной мощности, а следовательно, и стоимости ВДТ.

Выбор параметров ВДТ должен производиться с учетом как нормальных, так и послеаварийных режимов. Проходная мощность ВДТ не должна ограничивать пропускной способности других эле-

ментов сети, с которыми он соединен непосредственно, например трансформаторов связи или кабельных линий.

Оптимизация с помощью УПК. Компенсация неоднородности сети с помощью УПК может быть осуществлена путем включения в рассечку линий, создающих неоднородность, батарей статических конденсаторов или реакторов. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. При емкостной компенсации снижаются потери реактивной мощности, улучшается режим напряжений, но возрастают токи короткого замыкания. При индуктивной компенсации эффект будет противоположным. Очевидно, что в воздушных сетях следует применять емкостную компенсацию. Реакторы могут оказаться полезными для компенсации отдельных кабельных линий, особенно если сечение кабелей определяется токами короткого замыкания.

Значения дополнительных реактивных сопротивлений установок продольной компенсации можно определить весьма просто, если бы намечалась полная компенсация неоднородности на всех участках сети. Однако такое решение в сколько-нибудь развитых сетях явно нецелесообразно. Экономически оправданной может быть только частичная компенсация, при которой УПК устанавливаются не более чем по одной в контуре и по возможности не во всех контурах сети. При этом расчеты значительно усложняются. Здесь возможен такой ход рассуждений. Пусть в различных контурах сети введено $1, 2, \dots, t, \dots, T$ дополнительных реактивных сопротивлений x_t . Через произвольное сопротивление протекает мощность \dot{S}_t . Падение напряжения в этом сопротивлении

$$\Delta \dot{U}_t = \frac{jx_t(P_t + jQ_t)}{U_n} = \frac{-Q_t x_t + jP_t x_t}{U_n}.$$

Падение напряжения $\Delta \dot{U}_t$ равно по величине и противоположно по знаку э. д. с., возникающей в данном сопротивлении. Следовательно,

$$\Delta E_{at} = \frac{Q_t x_t}{U_n}; \quad (9)$$

$$\Delta E_{p.t} = \frac{-P_t x_t}{U_n}. \quad (10)$$

УПК можно рассматривать как своеобразный вольтдобавочный агрегат, вводящий в сеть дополнительную э. д. с. с продольной и поперечной составляющими, определяемыми выражениями (9) и (10). Агрегат саморегулирующийся, и в этом заключается его существенное преимущество перед устройствами других типов.

Оптимизация путем разрезания контуров сети. Разрезание контуров сети является наиболее простым средством оптимизации потокораспределения. Здесь требуются наименьшие дополнительные затраты, связанные с автоматизацией устройств для замыкания сети в отдельных точках при послеаварийных режимах. В сетях, замкнутых через трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой, разрезание контуров значительно упрощает управление регулированием трансформаторов. Проявляется возможность осуществлять регулирование, исходя из потребностей режима напряжений, не опасаясь вредного влияния перестановки ответвлений на потокораспределение.

Автор не предлагает переводить крупные районные сети на работу по разомкнутым схемам, но в отдельных случаях, особенно в местных сетях, разрезание может оказаться полезным.

Эффективность данного мероприятия зависит от правильного выбора точек разрезания. После расчета экономического потокораспределения в рассматриваемой сети следует разрезать наиболее слабо загруженные линии. Потокораспределение в полученной разомкнутой схеме будет близким к экономическому в исходной замкнутой.

При секционированных шинах подстанций в точках раздела экономического потокораспределения и при возможности распределения потребителей между секциями можно получить еще более высокую степень оптимизации.

Городские электрические сети часто построены по петлевым схемам и нормально работают разомкнутыми. Предварительный расчет экономического потокораспределения в предположении работы сети как замкнутой позволяет правильно выбрать точки разреза отдельных петель и получить наиболее высокую степень экономической эффективности работы сети. Подробнее этот вопрос рассматривается в [Л. 4 и 5].

Выводы. 1. Основными средствами оптимизации являются вольтдобавочные трансформаторы и установка продольной компенсации, преимущественно емкостной. Нерегулируемые УПК обеспечивают принятую степень оптимизации во всех режимах, если схема сети остается неизменной и относительные графики изменения нагрузок близки между собой. При несоблюдении этих условий следует рассмотреть вопрос о регулировании УПК.

2. В сетях, замкнутых через трансформаторы, применение УПК требует наличия уравновешенных э. д. с. трансформаторов. Для этого зачастую потребуется устройство дополнительных ответвлений, помимо стандартных.

3. При переводе местных электрических сетей на работу по замкнутым схемам следует тщательно учитывать влияние неоднородности. В ряде случаев такой перевод потребует применения дополнительных устройств или вообще окажется нецелесообразным.

4. После оптимизации потокораспределения в мощных районных сетях может существенно измениться режим напряжений, однако расчеты показывают, что это не оказывает большого влияния на параметры оптимизирующих устройств. В предельном случае при полной компенсации неоднородности сети с помощью УПК изменения режима напряжений не оказывают никакого влияния на величину компенсирующих сопротивлений.

5. Более высокие требования следует предъявлять к точности расчетов режимов, особенно при проектной постановке задачи. Иначе можно прийти к совершенно искаженной технико-экономической оценке рассматриваемых решений. По этой же причине должна быть одинаковой степень точности расчета режима до и после оптимизации.

6. Расчеты режимов при наличии УПК или при разрезании контуров сети могут быть выполнены с любой степенью точности. Рассмотренный выше расчет режима сетей с ВДТ является приближен-

ным и применим полностью только к сетям сравнительно небольшой мощности. Для крупных районных сетей желательно иметь наряду с приближенными также и более точные методы расчета. Ряд положений по расчету электрических сетей с трансформаторными связями дан в [Л. 6]. Работы в этом направлении ведутся также на кафедре электрических сетей и систем Киевского политехнического института.

Одной из задач дальнейших исследований является сравнительная технико-экономическая оценка различных способов оптимизации.

Приложение. Выполнялись расчеты по оптимизации потокораспределения для сети 35/10 кв, коммутационная и расчетная схемы которой представлены на рисунках 1, а и б. Показанные на рис. 1, б сопротивления участков приведены к напряжению 10 кв. Нагрузки соответствующих пунктов включают потери холостого хода трансформаторов.

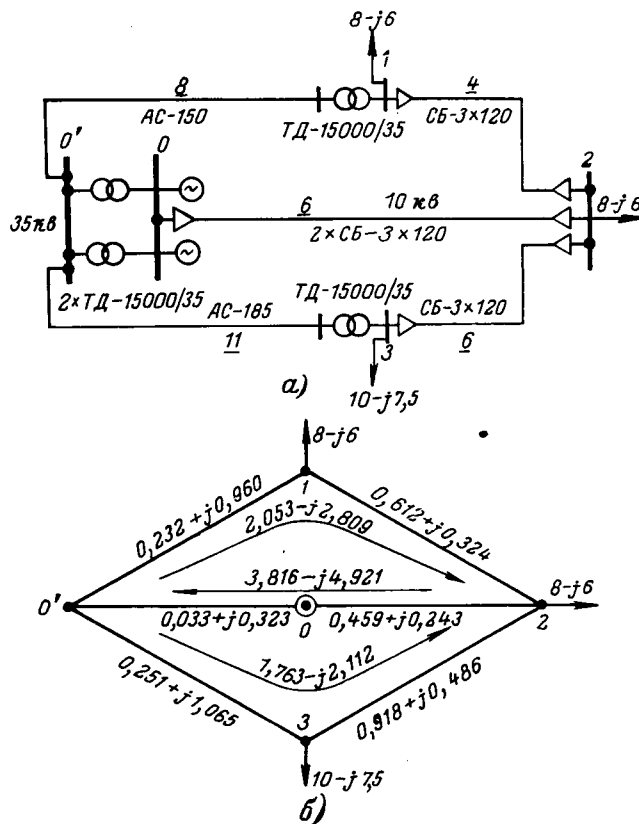
Основные показатели сети при различных вариантах оптимизации приведены в сводной таблице. В качестве таких показателей приняты значения: потерь активной и реактивной мощностей в сети и дополнительных устройствах, напряжения в точке 2 тока в кабельной линии 0—2. Допустимый ток этой линии равен 620 а. Потери мощности во всех случаях вычислялись с учетом режима напряжений.

На рис. 2 нанесены естественное и экономическое потокораспределение в сети.

При оптимизации с помощью ВДТ установка последних предполагалась в ветви 2—0—0. Удельные уравнивающие мощности при вводе в эту ветвь единичной э. д. с. показаны стрелками на рис. 1, б.

Расчет согласно (5) и (6) дал такие значения составляющих оптимизирующей э. д. с.:

$$\Delta E_a = 1,097 \text{ кв} \text{ и } \Delta E_p = 1,465 \text{ кв.}$$



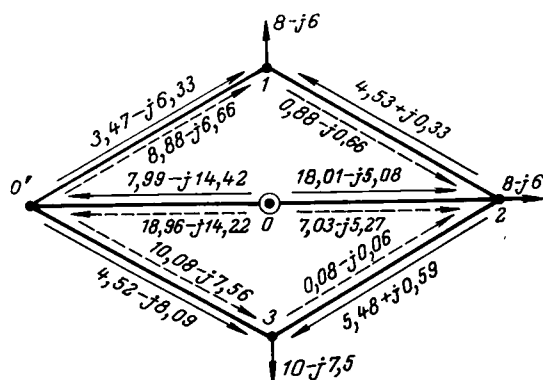


Рис. 2.

— естественное потокораспределение;
- - - экономическое потокораспределение.

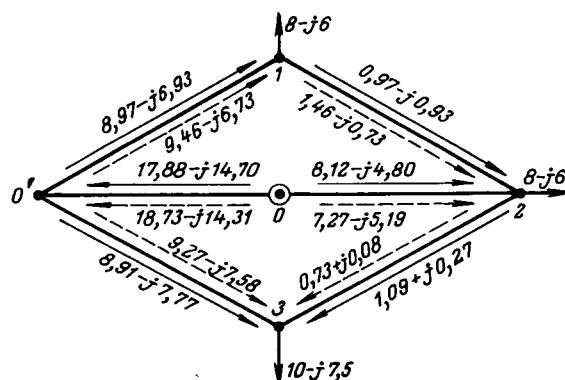


Рис. 4.

— емкостная УПК; - - - индуктивная ИПК.

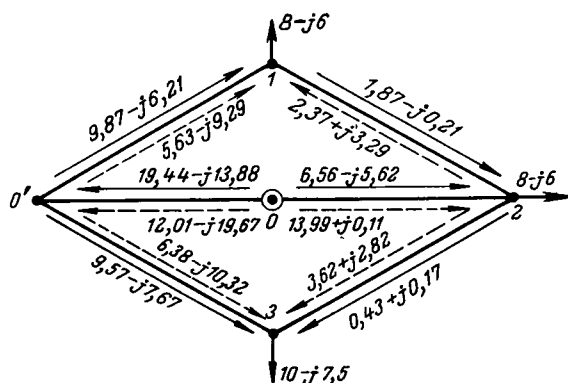


Рис. 3

— установка ВДТ; - - - подбор коэффициентов трансформации.

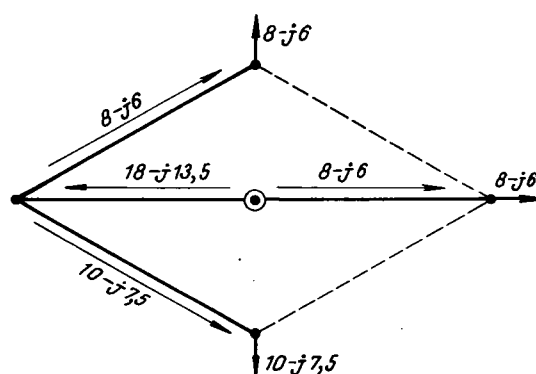


Рис. 5.

Продольная э. д. с. обеспечивается подбором ответвлений трансформаторов. Стандартные повышающие трансформаторы имеют коэффициент трансформации $k_1 = 10,5/38,5 \pm 2 \times 2,5\%$.

Во всех вариантах расчета принято $k_1 = 10,5/38,5$. Для получения желательной величины продольной э. д. с. можно использовать имеющееся ответвление понижающих трансформаторов 35,875/11. Ему соответствует продольная э. д. с. $\Delta E_a = 1,105$ кв.

Поперечный ВДТ при включении его в догружаемую часть ветви 2—0—0, т. е. перед повышающим трансформатором, должен иметь проходную мощность 30 Мва. Целесообразнее включить его на выходе разгружаемой кабельной линии 0—2. В этом случае проходная мощность ВДТ определяется допустимой нагрузкой кабелей данной линии и оказывается равной 10 Мва. Добавочную э. д. с. ВДТ примем равной 1,5 кв (15%).

После определения уравнивающих мощностей согласно (3) и (4) и их наложения на исходное потокораспределение получим результирующее распределение, показанное на рис. 3.

Там же нанесено потокораспределение, возникающее при откате от поперечных ВДТ и оптимизации только за счет подбора ответвлений трансформаторов.

Оптимизация с помощью УПК может быть выполнена путем установки батарей статических конденсаторов в рассечку участка 0—0 или с помощью реакторов на участке 0—2.

Значения составляющих оптимизирующей э. д. с. приведены выше и для обоих вариантов остаются неизменными. Необходимые дополнительные реактивные сопротивления соответственно равны — 0,742 ом (емкость) или 2 ом (индуктивность).

При емкостной компенсации принимаем конденсаторы типа КПМ0,6-50-1 с такими характеристиками: $Q_{ko} = 50$ квар, $U_{ko} = 600$ в, $I_{ko} = 83,3$ а, $x_{ko} = 7,2$ ом. Батарея может быть установлена либо на входе, либо на выходе повышающих трансформаторов. При теоретически одинаковой установленной мощности батареи установка на выходе потребует больших затрат на изоляцию, поэтому предпочтительнее установка на входе. Расчетный ток батареи определяется номинальной

Сводная таблица основных показателей сети при различных вариантах оптимизации потокораспределения

| Характер потокораспределения и метод оптимизации | Потери мощности (квт и квар) | | | | | | I_{0a}, a | $U_2, кв$ |
|--|------------------------------|------------|---------------|------------|------------|------------|-------------|-----------|
| | В сети | | В устройствах | | Всего | | | |
| | ΔP | ΔQ | ΔP | ΔQ | ΔP | ΔQ | | |
| Естественное | 2 444 | — 3 450 | — | — | 2 444 | — 3 450 | 1 080 | 9,55 |
| Экономическое | 982 | — 3 640 | — | — | — | — | — | — |
| Подбор ответвлений | 1 804 | — 4 045 | — | — | 1 804 | — 4 045 | 308 | 9,87 |
| Установка ВДТ | 1 006 | — 3 670 | 50 | —255 | 1 056 | — 3 925 | 500 | 9,97 |
| Емкостная УПК | 927 | — 3 000 | 13 | 3 685 | 940 | 685 | 545 | 10,02 |
| Индуктивная УПК | 1 096 | — 3 670 | 22 | —770 | 1 118 | — 4 440 | 516 | 8,96 |
| Разрезание контуров | 1 035 | — 3 490 | — | — | 1 035 | — 3 490 | 577 | 10,00 |

мощностью трансформаторов. В данном случае потребуется на фазу 21 параллельная цепь из двух соединенных последовательно конденсаторов. Общие данные батарей: $x_6 = -0,686 \text{ ом}$, общее число элементов 126 штук, установленная мощность $Q_6 = 6 \text{ 300 квар}$.

При индуктивной компенсации реакторы устанавливаются на выходе линии 0—2. Расчетный ток реакторов определяется с допустимым по нагреву током этой линии. Могут быть применены реакторы типа РБА10-600-10 по два на фазу, включенные последовательно. Параметры установки: $x_p = 1,928 \text{ ом}$, $r_p = 0,056 \text{ ом}$.

Потокораспределения, которые установятся в сети при обоих вариантах компенсации, представлены на рис. 4.

Наконец, на рис. 5 нанесено распределение мощностей, возникающее после разрезания линий 2—1 и 2—3, слабо загруженных при экономическом потокораспределении.

Оценивая полученные результаты, отметим:

1. Из-за перегрузки кабельной линии 0—2 недопустима работа рассматриваемой сети с естественным потокораспределением и при его улучшении путем подбора ответвлений трансформаторов.

2. Емкостная УПК обеспечивает потери активной мощности меньше теоретического минимума, что объясняется повышением уровней напряжений в сети.

3. Наиболее целесообразен в данном случае переход на работу сети по разомкнутой схеме

Литература

1. Холмский В. Г., Улучшение распределения потоков активных и реактивных мощностей в электрических сетях высокого напряжения, Сб. аннотаций научно-исследовательских работ вузов ВКВШ, 1940, № 3.
2. Холмский В. Г., Применение регулируемых трансформаторов в электрических сетях, Госэнергоиздат, 1950.
3. Глазунов А. А., Электрические сети и системы, Госэнергоиздат, 1954.
4. Холмский В. Г., Щербина Ю. В. и Ничипорович Л. В., Выбор оптимальных проектных и эксплуатационных решений с помощью ЭЦВМ методами дискретного спуска, «Энергетика и электропромышленность», 1964, № 2.
5. Холмский В. Г., Щербина Ю. В., Зорин В. В. и Ничипорович Л. В., Применение ЦВМ для выбора оптимальных точек разрезов городских электрических сетей, Применение вычислительной техники в электроэнергетике (материалы конференции), Московский дом научно-технической пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, М., 1964.
6. Мельников Н. А., Расчеты режимов работы сетей электрических систем, Госэнергоиздат, 1950.

[18.2.1965]



УДК 62-50

Особенности замкнутых систем регулирования скорости изменением потока возбуждения

Л. М. ПОЛЯКОВ и М. П. РАШКОВИЧ

Одесса

Создание двигателей постоянного тока серии П с широким диапазоном регулирования скорости путем изменения потока возбуждения позволяет значительно расширить применение электроприводов с регулированием скорости при постоянной мощности. Потребность в этом особенно велика в станкостроении (в приводах главного движения шлифовальных, токарных и карусельных станков).

Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков разработана новая серия приводов с кремниевыми диодами, которая начинает широко применяться в промышленности. Скорость в этих приводах регулируется изменением потока возбуждения.

В ряде случаев необходимо создание приводов с повышенной жесткостью механических характеристик. Создание таких систем целесообразно производить на базе указанных выше приводов путем введения жесткой обратной отрицательной связи по скорости.

Такой привод разработан в СКБ-3 (г. Одесса). В процессе разработки и экспериментальной проверки привода выявлен ряд его особенностей, не нашедших до настоящего времени отражения в литературе. Сущность этих особенностей заключается в следующем.

В замкнутой системе регулирования скорости изменением потока возбуждения наблюдается значи-

тельное уменьшение вращающего момента, особенно во время переходных процессов. Это приводит к снижению перегрузочной способности привода и значительно ухудшает качество переходных процессов. Механические характеристики приобретают параболическую форму, причем форма характеристики вход — выход усилительного звена. Жесткость механической характеристики становится зависимой от скорости холостого хода, и характер этой зависимости также определяется формой характеристики усилительного звена.

При проектировании привода с замкнутой системой регулирования скорости изменением потока возбуждения перечисленные особенности необходимо учитывать.

Механические характеристики. Для двигателей с независимым возбуждением механические характеристики целесообразно строить в координатах $(n—I)$. Это объясняется тем, что максимальный момент двигателя изменяется с изменением скорости, в то время как допустимый ток остается почти неизменным. При этом точки механических характеристик, соответствующие номинальной нагрузке, лежат на одной ординате.

Как известно, механические характеристики данного двигателя представляют собой прямые, проходящие через точку

$$(n=0; I_k = \frac{U}{r}),$$

где I_k — ток в якорной цепи при заторможенном якоре;

r — сопротивление цепи якоря;

U — э. д. с. источника.

В разомкнутой системе относительное изменение скорости на искусственных характеристиках при изменении нагрузки двигателя такое же, как и на естественной. Механические характеристики замкнутой системы значительно отличаются от характеристик разомкнутой системы.

На рис. 1, а приведена упрощенная структурная схема замкнутой системы регулирования скорости изменением потока возбуждения.

В зависимости от вида характеристики вход — выход усилительного звена системы регулирования подразделяются на системы с возрастающей (рис. 1, а) и падающей (рис. 1, б) характеристиками.

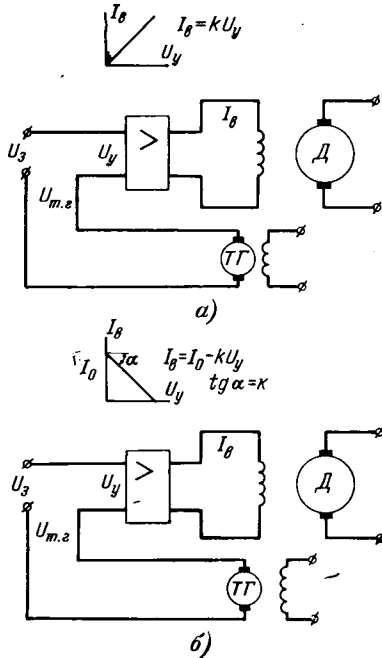


Рис. 1.

Вид характеристики усилительного звена определяет ряд особенностей системы, в том числе и форму механической характеристики.

В первом случае возможно управление приводом при соблюдении условия

$$U_y = U_{т.г} - U_3 \quad (1)$$

либо

$$U_y = U_{т.г} + U_3. \quad (2)$$

При падающей характеристике усилительного звена управление возможно при условии

$$U_y = U_3 - U_{т.г}. \quad (3)$$

Рассмотрим уравнение механической характеристики для всех трех случаев.

1. Решив совместно известные уравнения элементов системы

$$n = \frac{U - I_r}{k_e I_B}; \quad (4)$$

$$I_B = k(U_{т.г} - U_3); \quad (5)$$

$$U_{т.г} = c_{ет.г} n, \quad (6)$$

получим:

$$Bn^2 - AU_3 n - (U - Ir) = 0; \quad (7)$$

$$A = k_e k;$$

$$B = A c_{ет.г}.$$

Отсюда

$$n = \frac{AU_3 \pm \sqrt{(AU_3)^2 + 4B(U - Ir)}}{2B}. \quad (8)$$

Не принимая во внимание отрицательное решение, получим уравнение механической характеристики

$$n = \frac{AU_3 + \sqrt{(AU_3)^2 + 4B(U - Ir)}}{2B}. \quad (9)$$

Выражение (9) представляет собой уравнение параболы (рис. 2, а) с координатами вершины

$$n_1 = \frac{AU_3}{2B};$$

$$I_1 = \frac{4BU + (AU_3)^2}{4Br}$$

либо

$$n_1 = \frac{U_3}{2c_{ет.г}};$$

$$I_1 = \frac{4c_{ет.г} + k_e k U_3^2}{4c_{ет.г} r}.$$

Координаты точки пересечения механической характеристики с осью тока следующие:

$$n = 0;$$

$$I_k = \frac{U}{r}.$$

Скорость идеального холостого хода равна:

$$n_0 = \frac{AU_3 + \sqrt{(AU_3)^2 + 4BU}}{2B}. \quad (10)$$

Абсолютное изменение скорости при изменении нагрузки двигателя характеризуется уравнением

$$\Delta n = \frac{AU_3 + \sqrt{(AU_3)^2 + 4BU}}{2B} - \frac{AU_3 + \sqrt{(AU_3)^2 + 4B(U - Ir)}}{2B}. \quad (11)$$

Относительное изменение скорости вычисляется по формуле

$$\beta = 1 - \frac{AU_3 + \sqrt{(AU_3)^2 + 4B(U - Ir)}}{AU_3 + \sqrt{(AU_3)^2 + 4BU}}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) следует, что с увеличением задающего сигнала (U_3), а следовательно, и скорости холостого хода относительное изменение скорости при увеличении нагрузки двигателя уменьшается (в разомкнутой системе остается неизменным). Поскольку ток якоря не может превышать величину

$$I_k = \frac{U}{r},$$

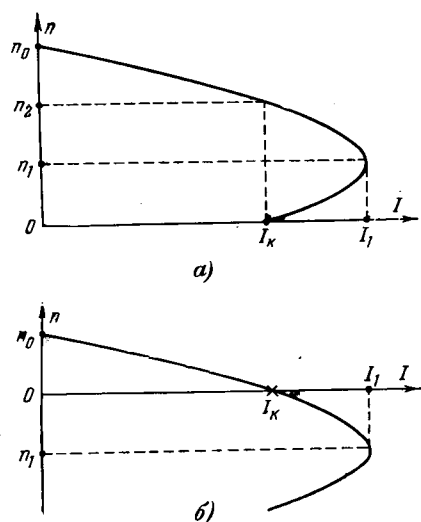


Рис. 2.

то, естественно, участок механической характеристики, соответствующий величинам тока, превышающим I_k , является фиктивным: при $I = I_k$ происходит «опрокидывание» двигателя.

2. Аналогично показанному выше может быть выведено уравнение механической характеристики, соответствующей условию (2). В этом случае

$$n = \frac{-AU_3 + \sqrt{(AU_3)^2 + 4B(U - Ir)}}{2B}. \quad (13)$$

Равенство (13), так же как и выражение (9), является уравнением параболы (рис. 2, б) со следующими координатами вершины:

$$n_1 = -\frac{AU_3}{2B};$$

$$I_1 = \frac{(AU_3)^2 + 4BU}{4Br}$$

либо

$$n_1 = -\frac{U_3}{2c_{ет.г}};$$

$$I_1 = \frac{k_e k U_3^2 + 4c_{ет.г} U}{4c_{ет.г} r}.$$

Точка пересечения механической характеристики с осью тока характеризуется координатами:

$$n = 0;$$

$$I_k = \frac{U}{r}.$$

Скорость идеального холостого хода равна:

$$n_0 = \frac{-AU_3 + \sqrt{(AU_3)^2 + 4BU}}{2B}. \quad (14)$$

Относительное изменение скорости при увеличении нагрузки двигателя составляет:

$$\beta = 1 - \frac{\sqrt{(AU_3)^2 + 4B(U - Ir)} - AU_3}{\sqrt{(AU_3)^2 + 4BU} - AU_3}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) следует, что с увеличением задающего сигнала, а следовательно, с уменьшением скорости идеального холостого хода двигателя относительное изменение скорости при увеличении нагрузки уменьшается, т. е. происходит процесс, об-

ратный рассмотренному в первом случае. Отличительной особенностью этого варианта системы электропривода является малый коэффициент обратной связи, что приводит к резкому снижению ее чувствительности и эффективности.

Это объясняется тем, что для соблюдения условия (2) необходимо выполнить следующие требования:

$$\left. \begin{aligned} U_3 &< U_y; \\ U_{т.г} &< U_y. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3. Уравнение механической характеристики для третьего варианта построения системы имеет вид:

$$n = \frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4B_1(U - Ir)}}{2B}, \quad (17)$$

где

$$A_1 = k_e(kU_3 - I_0);$$

$$B_1 = k k_e c_{ет.г},$$

т. е. оно аналогично уравнению (9) со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Уравнение момента. В разомкнутой системе регулирования вращающий момент двигателя постоянного тока при неизменном регулирующем воздействии пропорционален току якоря:

$$M_p = c_m \Phi_p I. \quad (18)$$

В рассматриваемой системе с ростом тока при увеличении нагрузки двигателя одновременно происходит уменьшение потока, а это в свою очередь вызывает уменьшение момента. В этом случае относительное изменение скорости двигателя в разомкнутой и замкнутой системах регулирования равно:

$$\beta_p = \frac{\Delta n_p}{n_0}; \quad (19)$$

$$\beta_3 = \frac{\Delta n_3}{n_0}. \quad (20)$$

Относительное изменение скорости при увеличении нагрузки двигателя (по току) от нуля до номинальной будем называть номинальным:

$$\beta_{p.н} = \frac{\Delta n_{p.н}}{n_0}; \quad (21)$$

$$\beta_{3.н} = \frac{\Delta n_{3.н}}{n_0}, \quad (22)$$

где

$$\Delta n = n_0 - n. \quad (23)$$

; Для разомкнутой системы

$$\Delta n_p = \frac{Ir}{k_e \Phi_p}, \quad (24)$$

где Φ_p — магнитный поток двигателя в разомкнутой системе.

Для замкнутой системы при той же скорости идеального холостого хода

$$\Delta n_3 = \frac{U}{k_e \Phi_p} - \frac{U}{k_e \Phi_3} + \frac{Ir}{k_e \Phi_3}, \quad (25)$$

где Φ_3 — магнитный поток двигателя в замкнутой системе при данной скорости.

Отсюда

$$\Delta n_3 = \frac{U(\Phi_3 - \Phi_p) + Ir\Phi_p}{k_e \Phi_3 \Phi_p}. \quad (26)$$

Из уравнений (19), (20), (24), (26) следует, что

$$\frac{\beta_p}{\beta_s} = \frac{Ir\Phi_s}{U(\Phi_s - \Phi_p) + Ir\Phi_p} \quad (27)$$

или

$$\frac{\beta_p}{\beta_s} = \frac{Ir}{U - \frac{\Phi_p}{\Phi_s}(U - Ir)}, \quad (28)$$

откуда

$$\frac{\Phi_p}{\Phi_s} = \frac{\frac{\beta_p}{\beta_s}U - Ir}{\frac{\beta_p}{\beta_s}(U - Ir)}. \quad (29)$$

Поскольку

$$\frac{Ir}{U} = \beta_p, \quad (30)$$

то

$$\frac{\Phi_p}{\Phi_s} = \frac{\frac{\beta_p}{\beta_s} - \beta_p}{\frac{\beta_p}{\beta_s}(1 - \beta_p)}. \quad (31)$$

Упростив это выражение, получим:

$$\frac{\Phi_p}{\Phi_s} = \frac{1 - \beta_s}{1 - \beta_p}. \quad (32)$$

При номинальном токе двигателя

$$\frac{\Phi_{p.n}}{\Phi_{s.n}} = \frac{1 - \beta_{s.n}}{1 - \beta_{p.n}}. \quad (33)$$

Из уравнения (33) следует, что момент двигателя в замкнутой системе можно определить по формуле

$$M_s = c_m I \Phi_p \frac{1 - \beta_p}{1 - \beta_s}, \quad (34)$$

где

$$\beta_p = f_1(I); \quad \beta_s = f_2(I).$$

Механическую характеристику электродвигателя в диапазоне изменения тока от нуля до $2I_n$ можно с достаточной степенью точности аппроксимировать прямой. В этом случае уравнение момента примет вид:

$$M_s = c_m I \Phi_p \frac{1 - \beta_{p.n} \frac{I}{I_n}}{1 - \beta_{s.n} \frac{I}{I_n}} \quad (35)$$

или

$$M_s = c_m I \Phi_p \frac{I_n - \beta_{p.n} I}{I_n - \beta_{s.n} I}. \quad (36)$$

Анализ этого уравнения показывает, что с увеличением тока момент вначале растет, а затем уменьшается, становясь равным нулю при

$$I\beta_{p.n} = I_n. \quad (37)$$

Для определения значения тока, соответствующего максимальной величине момента, найдем производную момента по току:

$$\frac{dM_s}{dI} = c_m \Phi_p \left[\frac{(I_n - \beta_{s.n} I) I_n + I_n I \beta_{s.n} - 2\beta_{p.n} I_n I}{(I_n - \beta_{s.n} I)^2} + \frac{2\beta_{s.n} \beta_{p.n} I^2 - \beta_{p.n} \beta_{s.n} I^2}{(I_n - \beta_{s.n} I)^2} \right]. \quad (38)$$

Приравняв производную нулю, получим:

$$\beta_{s.n} \beta_{p.n} I^2 - 2\beta_{p.n} I_n I + I_n^2 = 0, \quad (39)$$

откуда

$$I_{1,2} = \frac{\beta_{p.n} \pm \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}}}{\beta_{s.n} \beta_{p.n}} I_n. \quad (40)$$

Первый корень уравнения (39)

$$I_1 = \frac{\beta_{p.n} + \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}}}{\beta_{s.n} \beta_{p.n}} I_n \quad (41)$$

соответствует токам, значительно превышающим ток короткого замыкания. Однако он не имеет физического смысла. Отсюда следует, что ток, при котором двигатель развивает максимальный момент, вычисляется по формуле

$$I = \frac{\beta_{p.n} - \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}}}{\beta_{s.n} \beta_{p.n}} I_n. \quad (42)$$

Подставив уравнение (42) в равенство (35), получим формулу для расчета максимального момента двигателя

$$M_m = c_m \Phi_p I_n \frac{\beta_{p.n} - \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}}}{\beta_{s.n} \beta_{p.n}} \times \frac{1 - \frac{\beta_{p.n} - \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}}}{\beta_{s.n}}}{1 - \frac{\beta_{p.n} - \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}}}{\beta_{p.n}}}. \quad (43)$$

Отсюда

$$M_m = M \frac{(\beta_{p.n} - \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}})(\beta_{s.n} \beta_{p.n} + \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}})}{\beta_{s.n}^2 \sqrt{\beta_{p.n}^2 - \beta_{s.n} \beta_{p.n}}}, \quad (44)$$

где M — момент, развиваемый двигателем при номинальном токе на заданной скорости.

На рис. 3 приведены графики момента двигателя, работающего в разомкнутой (1) и замкнутой (2) системах регулирования.

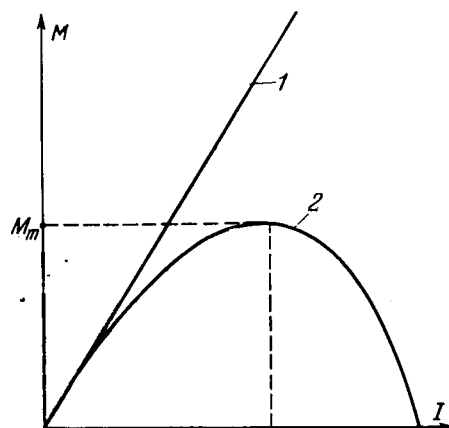


Рис. 3.

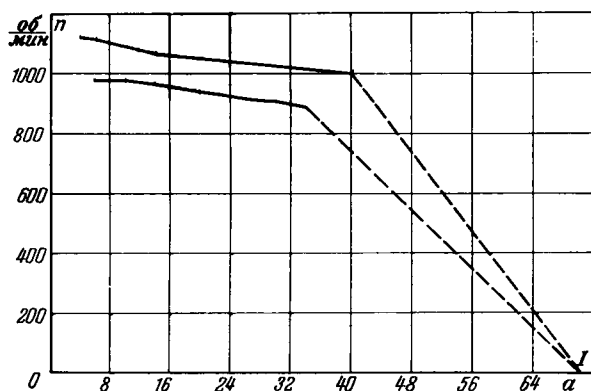


Рис. 4.

Зачастую величина тока, соответствующая максимальному моменту двигателя, может быть значительно меньше тока короткого замыкания (I_K).

На рис. 4 приведены механические характеристики двигателя П51, работающего в замкнутой системе регулирования. Здесь «опрокидывающий» момент двигателя соответствует току, значительно меньшему I_n . Это объясняется малой жесткостью характеристики разомкнутой системы регулирования.

Из уравнений (18) и (34) следует, что

$$\frac{M_a}{M_p} = \frac{1 - \beta_p}{1 - \beta_a}. \quad (45)$$

Обычно системы регулирования скорости путем изменения потока возбуждения строятся с применением полупроводниковых выпрямителей в сочетании с силовыми трансформаторами, согласующими напряжение сети с напряжением двигателя. У таких систем сравнительно большое активное сопротивление в якорной цепи, что приводит к значительному увеличению β_p .

С другой стороны, в приводах главного движения металлорежущих станков предъявляются достаточно высокие требования к величине относительного изменения скорости при изменении нагрузки. Она должна быть не более 0,1—0,15. При обеспечении этого требования происходит значительное уменьшение момента двигателя [см. формулу (45)]. Особенно это сказывается при кратковременных перегрузках. В этом случае для исключения «опрокидывания» двигателя необходимо вводить жесткую положительную обратную связь по току с отсечкой.

При расчете систем регулирования, замкнутых по напряжению возбуждения при условии обеспечения заданного момента, так же следует производить учет уменьшения момента.

Мощность двигателя. Уменьшение момента при замыкании системы регулирования не приводит к уменьшению мощности благодаря увеличению скорости двигателя. Действительно, мощность двигателя в разомкнутой системе характеризуется уравнением

$$P_p = c_m \Phi_p I_{n0} (1 - \beta_p). \quad (46)$$

Мощность двигателя в замкнутой системе регулирования равна:

$$P_3 = c_m \Phi_3 I_{n0} (1 - \beta_3). \quad (47)$$

Следовательно,

$$\frac{P_p}{P_3} = \frac{\Phi_p (1 - \beta_p)}{\Phi_3 (1 - \beta_3)}. \quad (48)$$

Решив совместно уравнения (32) и (48), получим:

$$\frac{P_p}{P_3} = 1. \quad (49)$$

Вопросы динамики. Рассмотрим изменение момента двигателя во время переходных процессов. При включении задающего сигнала и сигнала обратной связи в соответствии с уравнением (1) момент двигателя будет характеризоваться уравнением

$$M_3 = c_m I k_e k (U_{т.г} - U_3) \quad (50)$$

или

$$M_3 = c_m I k_e k (c_{ет.г} n - U_3). \quad (51)$$

Поскольку

$$I = \frac{U - c_{ед} \Phi_3 n}{r} \quad (52)$$

или

$$I = \frac{U - c_{ед} k_e k (c_{ет.г} n - U_3) n}{r}, \quad (53)$$

то

$$M_3 = \frac{c_m}{r} k_e k (c_{ет.г} n - U_3) \times [U - c_{ед} k_e k (c_{ет.г} n - U_3) n]. \quad (54)$$

При $n=0$, т. е. в момент начала пуска,

$$M_3 = - \frac{c_m k_e k}{r} U_3 U. \quad (55)$$

Если в цепи возбуждения нет элементов с односторонней проводимостью, то возможно вращение двигателя в обратную сторону. При наличии такого элемента начальный момент равен нулю и двигатель не разгонится.

При включении задающего сигнала и сигнала тахогенератора в соответствии с уравнением (3) [вариант (2) не рассматриваем как не имеющий практического значения] момент двигателя будет характеризоваться уравнением

$$M_3 = c_m I k_e [I_0 - k (U_3 - U_{т.г})]. \quad (56)$$

Поскольку

$$I = \frac{U - c_{ед} k_e [I_0 - k (U_3 - c_{ет.г} n)] n}{r}, \quad (57)$$

то

$$M_3 = \frac{c_m k_e}{r} [I_0 - k (U_3 - c_{ет.г} n)] \times \{U - c_{ед} k_e [I_0 - k (U_3 - c_{ет.г} n)] n\}. \quad (58)$$

При $n=0$

$$M_3 = \frac{c_m k_e U}{r} (I_0 - k U_3). \quad (59)$$

При

$$I_0 = k U_3$$

$$M_3 = 0.$$

Если $I_0 < k U_3$, то при отсутствии в цепи возбуждения элемента с односторонней проводимостью возможно включение двигателя в обратную сторону.

При $I_0 > k U_3$ пуск двигателя будет медленным. Время разгона при холостом ходе двигателя будет равно:

$$t = \frac{GD^2 r}{375 c_m k_e} \int_0^n \frac{dn}{[(I_0 - kU_0) - c_{eT.r} kn] [U - c_{eD} k_e I_0] + c_{eD} k_e k U_0 n - c_{eD} k_e k c_{eT.r} n^2]} \quad (60)$$

или

$$t = \frac{GD^2 r}{375 c_m k_e} \int_0^n \frac{dn}{(g + fn)(e + bn + an^2)}, \quad (61)$$

где

$$\begin{aligned} a &= -c_{eD} k_e k c_{eT.r}; & f &= -c_{eT.r} k; \\ b &= c_{eD} k_e k U_0; & g &= I_0 - kU_0; \\ c &= U - c_{eD} k_e I_0; \end{aligned}$$

После интегрирования выражения (61) при условии

$$4ac - b^2 > 0$$

получим:

$$\begin{aligned} t &= \frac{GD^2 r}{2 \cdot 375 c_m k_e (cf^2 - gbf + g^2 a)} \left\{ \left[f \ln \frac{(fn + g)^2}{an^2 + bn + c} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - f \ln \frac{g^2}{c} \right] + \frac{2(2ga - bf)}{\sqrt{4ac - b^2}} \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\operatorname{arctg} \frac{2an + b}{\sqrt{4ac - b^2}} - \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{4ac - b^2}} \right) \right\}. \quad (62) \end{aligned}$$

Если

$$4ac - b^2 < 0,$$

то время разгона равно:

$$\begin{aligned} t &= \frac{GD^2 r}{2 \cdot 375 c_m k_e (cf^2 - gbf + g^2 a)} \times \\ &\times \left\{ \left[f \ln \frac{(fn + g)^2}{an^2 + bn + c} - f \ln \frac{g^2}{c} \right] - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{2(2ga - bf)}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \left(\operatorname{Arth} \frac{2an + b}{\sqrt{b^2 - 4ac}} - \right. \\ & \left. - \operatorname{Arth} \frac{b}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \right) \}. \quad (63) \end{aligned}$$

Для сокращения времени переходного процесса и обеспечения условий для разгона двигателя необходимо либо отключать обратную отрицательную связь по скорости на время переходного процесса, либо вводить жесткую положительную обратную связь по току якоря.

Выводы. Момент двигателя в замкнутой системе уменьшается по сравнению с разомкнутой системой, однако мощность остается неизменной.

Механические характеристики замкнутой системы имеют параболическую форму и зависят от характеристики усилительного звена.

Жесткость механических характеристик зависит от скорости идеального холостого хода.

Динамические свойства замкнутой системы значительно хуже динамических характеристик разомкнутой системы привода.

Для улучшения динамических свойств привода и повышения его перегрузочной способности необходима жесткая положительная обратная связь по току якоря.

Применение рассмотренной системы привода следует рекомендовать при повышенном требовании к жесткости характеристик и невысоких требованиях к динамике привода.

[24.3.1965]

◇ ◇ ◇

УДК 338.40:621.3

Расчеты электрических сетей с учетом неодинаковости напряжения

Доктор техн. наук, проф. Р. И. КАРАЕВ

Московский институт инженеров железнодорожного транспорта

Введение. При проектировании местных распределительных сетей необходимо учитывать экономический ущерб у потребителей, который возникает при отклонениях напряжения на их зажимах относительно номинального значения. Если принять величину этого ущерба, как это рекомендуется в [Л. 1], зависимым от квадрата отклонения напряжения, то за расчетный промежуток времени T ущерб будет пропорционален величине

$$Y = \sum_{m=1}^n \alpha_m \frac{1}{T} \int_0^T p_m(t) [\Delta \Delta U_m(t)]^2 dt, \quad (1)$$

где $p_m(t)$ — активная мощность рассматриваемой нагрузки;

$\Delta \Delta U_m(t) = \frac{U_m(t) - U_n}{U_n}$ — отклонение напряжения от номинального значения в точке присоединения нагрузки;

α_m — коэффициент пропорциональности, который может быть различным для разных категорий потребителей.

Проверочные расчеты показали, что в формуле (1) изменяющаяся во времени мощность потреби-

теля $p_m(t)$ с небольшой погрешностью может быть заменена средним значением $p_{m\text{ ср}}$, т. е.

$$Y \approx \sum_{m=1}^n \alpha_m p_{m\text{ ср}} \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta \Delta U_m(t)]^2 dt = \sum_{m=1}^n \alpha_m p_{m\text{ ср}} N_m. \quad (2)$$

В связи с этим интегральная величина [Л. 2]

$$N_m = \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta \Delta U_m(t)]^2 dt, \quad (3)$$

обычно называемая «неодинаковостью напряжения», является важным показателем условий работы нагрузки.

Режим напряжения у нагрузки в местных сетях зависит от сечений проводов линий и от применяемых средств регулирования напряжения. Поэтому при решении задачи необходимо принять во внимание не только ущерб потребителей, но и капитальные затраты на сооружение сети и потери энергии в ней, т. е. расчетные затраты на сеть.

Для того чтобы излишне не усложнить конкретные расчеты, представляется целесообразным нормировать допустимую неодинаковость напряжения таким образом, чтобы при выполнении конкретного расчета соблюдалось следующее равенство:

$$\sum_{m=1}^n \alpha_m p_{m\text{ ср}} N_m = N_{\text{доп}} \sum_{m=1}^n p_{m\text{ ср}}^*. \quad (4)$$

Величина $N_{\text{доп}}$ должна быть установлена в результате технико-экономического обследования режимов работы типичных схем электрических сетей.

Отметим, что неодинаковость напряжения (3) имеет квадратичную форму. Поэтому она не может быть вычислена по частям с помощью ее значений в промежуточных точках сети — от источника питания до рассматриваемой нагрузки. Неодинаковость напряжения должна быть нормирована и вычислена непосредственно на зажимах нагрузки.

При выполнении расчетов электрических сетей встречаются две основные задачи:

изучение режима напряжения у нагрузок в сети, все параметры которой известны;

подбор необходимых сечений проводов на участках линий проектируемой сети.

Первая задача может возникнуть в разных случаях и, в частности, в условиях эксплуатации, когда к существующей сети намечено присоединить новые нагрузки. В связи с этим необходимо проверить расчетом режим напряжения в сети. Вторая задача обычно возникает при проектировании. При этом следует различать два случая; в распределительной сети осуществляется автоматическое регулирование напряжения, которое в основном и обеспечивает необходимый режим напряжения у нагрузок; автоматическое регулирование напряжения в сети не предусмотрено.

В первом случае сечения проводов линий распределительной сети так же, как это обычно делается

в сетях районного значения, должны быть выбраны по экономической плотности тока. Во втором случае сечения проводов должны обеспечить необходимый режим напряжения у нагрузок. Этот случай и будет рассмотрен ниже.

Вычисление неодинаковости напряжения у нагрузок при заданных параметрах сети. Как известно [Л. 3], обмотки высшего напряжения понижающих трансформаторов имеют регулировочные отводы, которые должны быть выбраны так, чтобы в режиме средних нагрузок напряжения у потребителей были бы как можно ближе к номинальному значению. Учитывая это, перепишем выражение (3) следующим образом:

$$N_m = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{U_m(t) - U_{m\text{ ср}} + U_{m\text{ ср}} - U_n}{U_n} \right)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{U_m(t) - U_{m\text{ ср}}}{U_n} \right)^2 dt + \left(\frac{U_{m\text{ ср}} - U_n}{U_n} \right)^2, \quad (5)$$

где $U_{m\text{ ср}}$ — напряжение у рассматриваемого потребителя в режиме средних нагрузок.

Рассмотрим случай, когда в сети осуществляется автоматическое регулирование напряжения. Так как регулирование напряжения у каждого приемника в отдельности вряд ли может быть оправдано экономически, осуществляется централизованное регулирование под нагрузкой на трансформаторах районной подстанции или с помощью вольтодобавочных автотрансформаторов, включенных в рассечку головных участков линий [Л. 4]. Предположим, что это регулирование напряжения осуществляется в зависимости от суммарной мощности нагрузок подстанции или соответственно головному участку линии [Л. 5]:

$$U_m(t) = U_{\text{ист. ср}} + b \frac{P(t) - P_{\text{ср}}}{U_n}. \quad (6)$$

Если всю схему сети привести к одному напряжению, то напряжение на рассматриваемой нагрузке (рис. 1) может быть вычислено по следующей формуле:

$$U_m(t) = U_{\text{ист}}(t) - \Delta U_m(t) = U_{\text{ист. ср}} + b \frac{P(t) - P_{\text{ср}}}{U_n} - \frac{\sum_{k=1}^{m_2} [P_k(t) R_k + Q_k(t) x_k]}{U_n}, \quad (7)$$

где $P_k(t)$ и $Q_k(t)$ — активная и реактивная мощности, протекающие по участку сети;

R_k и x_k — активное и реактивное сопротивление того же участка сети.

Величина m_2 в формуле (7) указывает, что суммирование распространяется на потери напряжения в понижающем трансформаторе и в сети низшего напряжения, питающей рассматриваемую нагрузку (рис. 3).

* Для «эталонного» потребителя коэффициент пропорциональности α целесообразно принять равным единице.

Мощности P_k и Q_k , протекающие по участкам сети, а также суммарная мощность P могут быть вычислены по мощностям нагрузок потребителей (см. ниже). При этом надо учесть следующее обстоятельство. Графики реактивных нагрузок, как правило, неизвестны, и в связи с этим обычно предполагают, что потребление нагрузкой реактивной мощности пропорционально ее активной мощности, т. е. принимают коэффициент мощности каждой нагрузки неизменным. Коэффициент реактивной мощ-

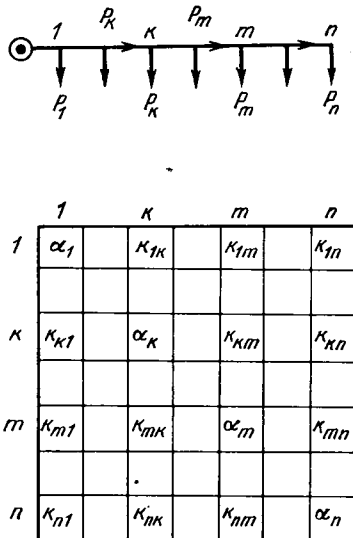


Рис. 1. Корреляционная таблица мощностей нагрузок потребителей.

ности, протекающей по участку линии $\lg \varphi_k$, ориентировочно может быть вычислен из следующего выражения:

$$\lg \varphi_k = \frac{\sum_{k=m}^n p_{kcp} \lg \varphi'_k}{\sum_{k=m}^n p_{kcp}},$$

где p_{kcp} — среднее значение нагрузки;
 $\lg \varphi'_k$ — коэффициент реактивной мощности нагрузки потребителя.

Обозначив расчетное сопротивление участка линии через

$$R_k + x_k \lg \varphi_k = a_k,$$

запишем искомое значение неодинаковости напряжения (5) с учетом режима средних нагрузок в следующем виде:

$$N_m = \frac{1}{U_n^4 T} \int_0^T \left\{ b [P(t) - P_{cp}] - \sum_{k=1}^{m_s} a_k [P_k(t) - P_{kcp}] \right\}^2 dt + \left(\frac{U_{mcp} - U_n}{U_n} \right)^2 =$$

$$= \frac{1}{U_n^4} \left\{ b^2 D[P] + \sum_{k=1}^{m_s} a_k^2 D[P_k] - 2b \sum_{k=1}^{m_s} a_k K[P, P_k] + 2 \sum_{i < k} a_k a_i K[P_k, P_i] \right\} + N_{mcp}, \quad (8)$$

где $D[P_k]$ и $K[P_k, P_i]$ — дисперсии и корреляционные моменты [Л. 6] активных нагрузок участков линии.

Если на шинах районной подстанции поддерживается постоянное напряжение, то неодинаковость напряжения у рассматриваемой нагрузки вычисляется по формуле

$$N_m = \frac{1}{U_n^4} \left\{ \sum_{k=1}^{m_s} a_k^2 D[P_k] + 2 \sum_{i < k} a_k a_i K[P_k, P_i] \right\} + N_{mcp}. \quad (9)$$

В том случае, когда регулирование напряжения осуществляется в соответствии с мощностью, протекающей по головному участку линии, т. е. если $P = P_1$, неодинаковость напряжения N_m также можно вычислить по формуле (9), однако вместо расчетного сопротивления головного участка линии следует подставить величину

$$a_1 = R_1 + x_1 \lg \varphi_1 - b. \quad (10)$$

Таким образом, получается, что при встречном регулировании расчетное сопротивление головного участка как бы уменьшается, а при большом значении b может даже стать отрицательной величиной.

Слагаемая неодинаковости напряжения

$$N_{mcp} = \left(\frac{U_{mcp} - U_n}{U_n} \right)^2. \quad (11)$$

при правильном выборе регулировочного ответвления у обмотки понизительного трансформатора обычно невелика. Она обусловлена невозможностью в точности подобрать это ответвление в соответствии с напряжением в сети в режиме средних нагрузок и зависит от величины ступени регулирования. Если ступень регулирования 2,5%, наиболее вероятное значение рассматриваемой слагаемой неодинаковости напряжения

$$N_{mcp} = \left(\frac{2,5}{4} \right)^2 = 0,39 (\%)^2;$$

при 5% ответвлений

$$N_{mcp} = \left(\frac{5}{4} \right)^2 = 1,56 (\%)^2.$$

Входящие в формулы (8) и (9) дисперсии $D[P]$ и $D[P_k]$, а также корреляционные моменты $K[P, P_k]$ и $K[P_k, P_i]$ должны быть вычислены с помощью данных о нагрузках потребителей.

Числовые характеристики нагрузок. С помощью типовых графиков нагрузок потребителей вычислены [Л. 7] дисперсии

$$d_k^* = \frac{1}{8760} \int_0^{8760} [p_k^*(t) - p_{kcp}^*]^2 dt$$

и корреляционные моменты

$$k_{k,i}^* = \frac{1}{8760} \int_0^{8760} [p_k^*(t) - p_{kcp}^*] [p_i^*(t) - p_{icp}^*] dt,$$

для единичных нагрузок

$$p^*_k(t) = \frac{p_k(t)}{p_{k,нб}}.$$

При выполнении конкретного расчета эти величины следует умножить соответственно на квадраты наибольших значений нагрузок и на их произведения:

$$d^*_k p_{кнб}^2 = d_k, \quad k^*_{k,i} p_{кнб} p_{i,нб} = k_{k,i}.$$

В результате получим корреляционную таблицу нагрузок потребителей рассматриваемой сети (рис. 1).

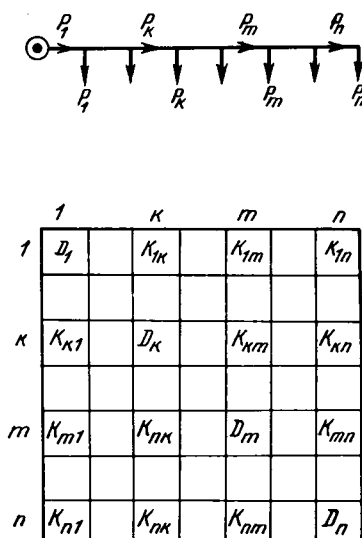


Рис. 2. Корреляционная таблица мощностей, протекающих по участкам сети.

Активная мощность нагрузки участка сети равна сумме нагрузок питаемых потребителей:

$$P_k = \sum_{i=k}^n p_i.$$

Поэтому дисперсия активной мощности нагрузки участка радиальной линии равна [Л. 6]:

$$D[P_k] = D\left[\sum_{i=k}^n p_i\right] = \sum_{i=k}^n d_i + 2 \sum_{\sigma > i} k_{i\sigma}, \quad (12)$$

т. е. вычисляется с помощью корреляционной таблицы мощностей нагрузок потребителей (рис. 1) как сумма элементов, расположенных в квадрате $k \div n \times \times k \div n$. В этом квадрате сосредоточены все элементы таблицы нагрузок потребителей, которые питаются с помощью данного участка радиальной сети.

Корреляционный момент мощностей, протекающих по двум участкам радиальной линии, равен:

$$\begin{aligned} K[P_k, P_i] &= M[(P_k - P_{kcp})(P_i - P_{icp})] = \\ &= M\left[\sum_{j=k}^n (p_j - p_{jcp}) \sum_{\sigma=i}^n (p_\sigma - p_{\sigma cp})\right] = \\ &= \sum_{j=k}^n \sum_{\sigma=i}^n k_{j,\sigma}. \end{aligned} \quad (13)$$

Следовательно, для того чтобы найти корреляционный момент нагрузок двух участков радиальной сети, необходимо просуммировать элементы корреляционной таблицы нагрузок потребителей (рис. 1), расположенные в прямоугольнике $k \div n \times \times i \div n$.

Величины (12) и (13) образуют корреляционную таблицу мощностей, протекающих по участкам сети (рис. 2). С помощью этой таблицы легко вычислить искомую неодинаковость напряжения (8) (см. пример).

Выбор проводов при постоянном сечении по длине линии. Предположим, что линия, питающая нагрузки, должна быть выполнена одним сечением. Рассмотрим случай, когда автоматическое регулирование напряжения в распределительной сети не предусмотрено. Необходимое сечение проводов найдем в соответствии с выражением (4). Для этого подставим в него выражение (9) для неодинаковости напряжения у нагрузок. Получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_H^4} \sum_{m=1}^n \alpha_m p_{mcp} \left\{ \sum_{k=1}^{m-1} a_k^2 D[P_k] + \right. \\ \left. + 2 \sum_{i < k} a_k a_i K[P_k, P_i] \right\} + \sum_{m=1}^n \alpha_m p_{mcp} N_{mcp} = \\ = N_{доп} \sum_{m=1}^n p_{mcp}. \end{aligned} \quad (14)$$

При расчете первого приближения коэффициент мощности всех нагрузок будем считать одинаковым и равным среднему значению. Тогда расчетное сопротивление 1 км линии будет на всех ее участках иметь одну и ту же величину

$$a_0 = r_0 + x_0 \operatorname{tg} \varphi.$$

Определим его с помощью формулы (14):

$$\begin{aligned} a_0 = \\ = \sqrt{\frac{U_H^4 \left(N_{доп} \sum_{m=1}^n p_{mcp} - \sum_{m=1}^n \alpha_m p_{mcp} N_{mcp} \right)}{\sum_{m=1}^n \alpha_m p_{mcp} \left\{ \sum_{k=1}^{m-1} l_k^2 D[P_k] + 2 \sum_{i < k} l_k l_i K[P_k, P_i] \right\}}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где l_k и l_i — длины соответствующих участков линии (рис. 1).

Искомое сечение проводов линии

$$F = \frac{1}{\gamma(a_0 + x_0 \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (16)$$

Принятое стандартное сечение $F_{ст}$ желательно проверить. Для этого необходимо вычислить по формуле (9) неодинаковость напряжения во всех точках сети (с учетом режима средних нагрузок, коэффициентов трансформации понизительных трансформаторов и действительных коэффициентов мощности на отдельных участках линии). Суммарный ущерб потребителей не должен превосходить допустимую величину, т. е.

$$|Y = \sum_{m=1}^n \alpha_m p_{mcp} N_m|_{F=F_{ст}} \leq N_{доп} \sum_{m=1}^n p_{mcp}. \quad (17)$$

Определение сечений проводов участков линии. Теперь рассмотрим случай, когда отдельные участки линии могут иметь разное сечение. При этом несколько осложняется эксплуатация линии, но может быть достигнуто экономически более целесообразное решение.

В качестве дополнительного условия примем постоянную плотность тока на различных участках линии. Это условие при неизменном расходе цветного металла приводит к наименьшим потерям энергии в проводах линии [Л. 3]. Учтем при этом, что потери энергии в линии пропорциональны не квадрату наибольшего значения тока (как это принималось раньше [Л. 3]), а квадрату его среднеквадратичного значения:

$$I_{\text{кр.кв}}^2 = \left(\frac{P_{\text{кр.кв}}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_k} \right)^2 = \frac{D[P_k] + P_{\text{кр.кв}}^2}{3U_n^2 \cos^2 \varphi_k}.$$

Постоянная плотность среднеквадратичного тока на всех участках линии соответствует равенствам

$$\frac{P_{1\text{кр.кв}}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_1 F_1} = \dots = \frac{P_{m\text{кр.кв}}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_m F_m} = \dots = \frac{P_{n\text{кр.кв}}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n F_n}. \quad (18)$$

Теперь предположим, что с помощью формулы (16) найдено сечение F , постоянное по длине линии (одинаковое для всех ее участков). Сохраняя тот же расход цветного металла, т. е. соблюдая равенство

$$\sum_{k=1}^n F_k l_k = F \sum_{k=1}^n l_k, \quad k=1, \dots, n, \quad (19)$$

реализуем условие (18):

$$\sum_{k=1}^n F_m \frac{P_{k\text{кр.кв}} \cos \varphi_m}{P_{m\text{кр.кв}} \cos \varphi_k} l_k = F l.$$

Получаемое искомое сечение провода участка линии

$$F_m = F l \frac{P_{m\text{кр.кв}}}{\cos \varphi_m \sum_{k=1}^n \frac{P_{k\text{кр.кв}}}{\cos \varphi_k} l_k} = F l \frac{\sqrt{D[P_m] + P_{m\text{кр.кв}}^2}}{\cos \varphi_m \sum_{k=1}^n \frac{\sqrt{D[P_k] + P_{k\text{кр.кв}}^2}}{\cos \varphi_k} l_k}, \quad (20)$$

где сечение F определяется по формулам (16). При этом расход цветного металла будет тот же, что и при выполнении линии постоянным сечением, но потери энергии, неодинаковость напряжений у нагрузок, а значит, и ущерб потребителей будут снижены, причем последний ниже нормированной величины.

При выборе стандартных сечений для участков линии, с тем чтобы несколько снизить расход цвет-

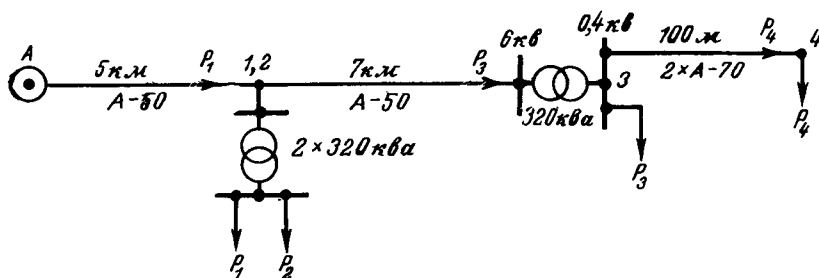


Рис. 3. Схема распределительной сети.

ного металла и приблизиться к допустимой величине ущерба потребителей, рекомендуется брать ближайшие меньшие. После этого необходима проверка экономического ущерба потребителей по формуле (17).

Пример. Линия 6 кВ питает две подстанции (рис. 3). Данные о наибольших и средних значениях нагрузок [Л. 7] сведены в табл. 1.

Таблица 1

| Потребитель | $P_{\text{квб}},$ квт | $P_{\text{квр}},$ % | $P_{\text{квр}},$ квт | $\cos \varphi'$ | $\lg \varphi'$ |
|--|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------|----------------|
| p_1 — мелкомоторная нагрузка | 150 | 59,0 | 88,5 | 0,8 | 0,75 |
| p_2 — освещение квартир | 80 | 33,0 | 26,4 | 1 | 0 |
| p_3 — коммунально-бытовая нагрузка сельского хозяйства | 120 | 49,9 | 59,9 | 1 | 0 |
| p_4 — производственная нагрузка сельского хозяйства | 150 | 55,5 | 83,3 | 0,8 | 0,75 |

Напряжение на шинах питающей районной подстанции постоянно, т. е. параметр регулирования $b=0$.

Найдем неодинаковость напряжения на зажимах нагрузок p_3 и p_4 . Для этого надо рассмотреть контур сети от источника энергии до нагрузки p_4 , составленный из участков $A-1$, $2-3$ и $3-4$.

Таблица 2

Корреляционная таблица мощностей нагрузок потребителей, ** квт² (см. рис. 1)

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|--|---|
| 1 | 840,7 · 10 ⁻⁴ × ×150 ² =1890 | 148,9 · 10 ⁻⁴ × ×150 · 80=178 | 410,5 · 10 ⁻⁴ × ×150 · 120=740 | 403,9 · 10 ⁻⁴ × ×150 · 150=910 |
| 2 | 178 | 671,4 · 10 ⁻⁴ × ×80 ² =429 | 445,8 · 10 ⁻⁴ × ×80 · 120=427 | 75,4 · 10 ⁻⁴ × ×80 · 150=90 |
| 3 | 740 | 427 | 459,6 · 10 ⁻⁴ × ×120 ² =660 | 219,3 · 10 ⁻⁴ × ×120 · 150=395 |
| 4 | 910 | 90 | 395 | 466,0 · 10 ⁻⁴ × ×150 ² =1050 |

** Корреляционную таблицу единичных нагрузок см. [Л. 7].

Таблица 3

Корреляционная таблица мощностей, протекающих по участкам рассматриваемого контура сети, квт^2 (см. рис. 2)

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|--------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 3 963+1 830+ +2 (910+740+ +178)=9 509 | 3 963+178+ +740+910= =5 791 | 3 017+740+ +910=4 667 | 1 535+910= =2 445 |
| 2 | 5 791 | 2 500+429+ +2 (90+427)= =3 963 | 2 500+427+ +90=3 017 | 1 445+90= =1 535 |
| 3 | 4 667 | 3 017 | 1 050+660+ +2·395=2 500 | 395+1 050= =1 445 |
| 4 | 2 445 | 1 535 | 1 445 | 1 050 |

Расчетные сопротивления участков сети:

$$a_1 = (r_{10} + x_{10} \operatorname{tg} \varphi_1) l_1 = (0,640 + 0,341 \cdot 0,450) \cdot 5 = 3,96 \text{ ом};$$

$a_2 = 0$, так как точки 1 и 2 совпадают (рис. 3);

$$a_3 + a_{\text{тр}} = (0,640 + 0,341 \cdot 0,417) 7 + 6,05 + 16,1 \cdot 0,417 = 18,23 \text{ ом};$$

$$a_4 = (0,022 + 0,015 \cdot 0,75) \left(\frac{6}{0,4} \right)^2 = 7,45 \text{ ом}.$$

Неодинаковость напряжения (9) у нагрузок

$$N_3 = \frac{10^4 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^4} (3,96^2 \cdot 9 509 + 18,23^2 \cdot 2 500 + 2 \cdot 3,96 \cdot 18,23 \cdot 4 667) + \\ + 1,56^{***} = 14,4 (\%)^2;$$

$$N_4 = 14,4 + \frac{1}{6^4 \cdot 10^2} [7,45^2 \cdot 1 050 + 2 (3,96 \cdot 7,45 \cdot 2 445 + \\ + 18,23 \cdot 7,45 \cdot 1 445) = 19,0 (\%)^2.$$

Литература

1. Caussens P., Réglage des fluctuations aléatoires de tension dans les réseaux électriques. Bulletin de l'Association Suisse des électriciens, № 26, Desembre 1959.
2. Ailleret P., L'introduction de la mesure dans la notion de la qualité du service d'une distribution d'électricité et son intérêt au point de vue de la conception des réseaux, Bulletin de la Société française des Électriciens, Janvier 1956.
3. Глазунов А. А. и Глазунов А. А., Электрические сети и системы, Госэнергоиздат, 1960.
4. Мельников Н. А., Регулирование напряжения в энергосистемах и повышение качества электрической энергии, «Электричество», 1962, № 8.
5. Карпов Ф. Ф., Количественная оценка качества напряжения в распределительной сети, «Электричество», 1962, № 8.
6. Вентцель Е. С., Теория вероятностей, Физматгиз, 1962.
7. Билик Н. И., Неодинаковость напряжения и статистические числовые характеристики нагрузок электрических сетей, «Электричество», 1964, № 8.

[10.2.1965]

*** Трансформаторы мощностью 320 кВА имеют отклонение $\pm 5\%$.



УДК 621.34:62-503.53

Быстродействующий тиристорный электропривод переменного тока с управлением от цифровой следящей системы

Доктор техн. наук, проф. В. А. ШУБЕНКО, инж. И. Я. БРАСЛАВСКИЙ и инж. В. В. КУЦИН

Уральский политехнический институт им. Кирова

Внедрение цифровых следящих систем (ЦСС) для управления электроприводами, которые с максимальным быстродействием должны обрабатывать различные перемещения по заданной жесткой программе, позволяет получить повышенную точность обработки командных импульсов при большой гибкости и надежности системы управления [Л. 1].

До настоящего времени при управлении от ЦСС обычно использовался силовой привод постоянного тока. Однако, как показали исследования [Л. 2], особенно перспективными оказываются подобные системы управления при создании автоматизированных асинхронных электроприводов, так как асинхронный двигатель, являясь исполнительным органом системы регулирования, обладает меньшей инерционностью, чем двигатели постоянного тока. Электромагнитные переходные процессы, происходящие в нем, в определенных условиях могут быть использованы для форсирования обра-

ботки командных импульсов, т. е. динамические свойства асинхронного двигателя могут обеспечить более быструю обработку заданных перемещений [Л. 3].

В рассматриваемых следящих электроприводах силовые элементы управления двигателем, в частности тиристоры, должны выполнять следующие функции в соответствии с сигналами, получаемыми от ЦСС:

1. Осуществлять пуск двигателя в нужном направлении.

2. Переводить электродвигатель в тормозной режим, когда оставшийся путь перемещения становится равным тормозному пути.

3. Переводить (в случае необходимости) двигатель в режим пониженной скорости, обеспечивающий корректирование положения механизма в процессе точной остановки.

4. Отключать систему электропривода от питающей сети после обработки программы.

Для формирования вышеуказанных сигналов в арифметическое устройство (АУ) следящей системы (рис. 1) вводятся в виде чисел, представленных двоичным кодом, программа перемещения (А) от программного устройства (ПУ) и код истинного положения механизма (В) от цифрового датчика положения (ЦДП), переводящего угол поворота какого-нибудь вала контролируемого механизма (М) в цифровой код. В частности, им может быть преобразователь «вал — цифра» (ПВЦ) барабанного типа [Л. 1]. АУ непрерывно вычисляет величину и знак рассогласования $\delta = A - B$. Знак δ служит для выбора направления вращения двигателя, а величина δ определяет момент перехода

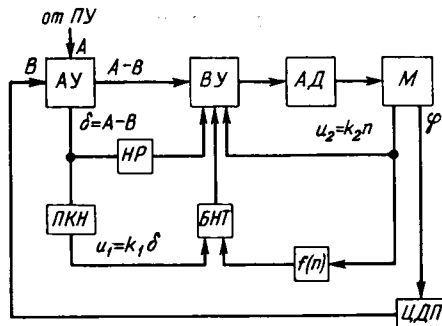


Рис. 1. Блок-схема силового следящего электропривода переменного тока с цифровым программным управлением.

электропривода в тормозной режим. В преобразователе кода в напряжении (ПРН) величина δ преобразуется в напряжение, пропорциональное рассогласованию, и подается в блок начала торможения (БНТ), где сравнивается с напряжением, функционально связанным со скоростью двигателя. В тот момент, когда тормозной путь равен оставшемуся пути, на выходе БНТ появляется сигнал для перевода электропривода в тормозной режим. Если БНТ настроен оптимально, то после окончания торможения при $n=0$ и $\delta=0$. Следовательно, привод отработал заданную программу.

Блок ноль-реле (НР) служит для определения равенства заданного и истинного положения механизма. Сигнал на его выходе появляется при $\delta=0$ ($A=B$). Если при срабатывании БНТ после окончания торможения привод не отработал заданную программу, то необходима корректировка положения механизма, т. е. работа привода в режиме малых скоростей для отработки до нуля оставшегося рассогласования. Заметим, что в случае управления электроприводом от ЦСС отработка задания происходит с точностью до одной единицы рассогласования, при этом за единицу принимается различная величина перемещения в зависимости от требований, предъявляемых к механизму.

Выходные устройства (ВУ) системы (рис. 1), управляющие работой тириستоров, включенных в силовые цепи асинхронного двигателя (АД), на основе переработки поступающей в них информации должны обеспечивать выбранные пуско-тормозные и регулировочные режимы работы электропривода для получения быстрой и точной обра-

ботки заданных программ и устойчивой работы всей системы.

При применении тириستоров для управления асинхронным двигателем легко осуществить как динамическое, так и противоточное торможение. Однако в тех случаях, когда работа двигателя не лимитируется условиями нагрева, но требуется повышенное быстродействие, с успехом может быть применено противоточное торможение со стабильным отключением электродвигателя при скорости $n=0$ благодаря безынерционности, легкой управляемости и стабильности работы тиристоров.

Для повышения быстродействия электропривода примем вариант с противоточным торможением. Очевидно, что для получения оптимального по быстродействию и точности режима отработки командных импульсов необходимо осуществить правильный выбор момента начала торможения из условия равенства оставшегося пути отработки тормозному пути. Задача осложняется тем, что в большинстве случаев приводы работают по программе малых перемещений, и торможение начинается не с установившейся скорости. Так как в БНТ сравниваются напряжения, одно из которых связано со скоростью двигателя, а другое пропорционально рассогласованию, необходимо выяснить, какой вид должна иметь функциональная зависимость пути торможения от скорости $\varphi_T = f(n)$, при которой электропривод переходит в тормозной режим. Эту зависимость реализует функциональный преобразователь $f(n)$ (рис. 1) для введения ее в БНТ.

Рассчитаем зависимость $\varphi_T = f(n)$, воспользовавшись упрощенной формулой Клосса и переходя от скольжения к скорости. Для противоточного торможения до скорости $n=0$ при $M_{cm}=0$ будем иметь:

$$\varphi_T = \frac{GD^2}{375 \cdot 2M_{кр} \cdot 60n_0 S_{кр}} \left(\frac{n_2^3}{3} + n_0 \frac{n_2^2}{2} + n_0^2 S_{кр}^2 n_2 - n_0^3 S_{кр}^2 \ln \frac{n_0 + n_2}{n_0} \right), \quad (1)$$

где φ_T — угол торможения в оборотах;

n_0 — синхронная скорость, об/мин;

n_2 — скорость, при которой электропривод переходит в режим противоточного торможения, об/мин.

Так как при применении тиристоров привод практически сразу после появления сигнала на выходе БНТ переходит в тормозной режим, то зависимость $\varphi_T = f(n)$, рассчитанная по формуле (1), может быть реализована преобразователем $f(n)$ без корректировки. Если же есть задержка времени в отработке сигналов, поступающих от ЦСС, и она такова, что за это время привод проходит путь, больший единицы рассогласования, то преобразователь $f(n)$ должен быть выполнен с учетом пути, проходимого за время задержки. Функциональный преобразователь $f(n)$ выполнен на основе кусочно-линейной аппроксимации функции $f_T = f(n)$ с помощью диодов [Л. 4].

Если после окончания торможения при $n=0$ рассогласование $\delta \neq 0$, то необходимо произвести

корректировку механизма в положении точной остановки. При этом привод переводят в режим работы на пониженной скорости [Л. 1 и 2]. Однако ввиду практической безынерционности тиристоров (время срабатывания измеряется микросекундами) и стабильности работы возможна корректировка без введения режима устойчивой пониженной скорости. Обработка до нуля оставшегося рассогласования производится по треугольной скоростной диаграмме с чередованием двигательного и тормозного (противоточного) режимов при определенной уставке скорости $n_{\text{пон}}$ (режим импульсной доводки). Значение пониженной скорости нужно выбирать с таким расчетом, чтобы не снижать производительности механизма и в то же время избежать колебаний системы в положении точной остановки.

Так как обработка рассогласования ведется с точностью до единицы, то необходимо выполнить следующее условие: после срабатывания ноль-реле ($A=B$, $\delta=0$) тормозной путь привода с пониженной скорости до скорости $n=0$ должен быть меньше единицы рассогласования, т. е.

$$\varphi_2 < \Delta\theta, \quad (2)$$

где φ_2 — угол в оборотах, проходимый двигателем при торможении с пониженной скорости;

$\Delta\theta$ — угловой путь вала двигателя в оборотах, пригимаемый за единицу рассогласования (допустимая точность обработки программы).

При противоточном торможении с пониженной скорости тормозной момент M_T можно приближенно считать постоянным и равным пусковому $M_{\text{п}}$. Поэтому из условия (2) получим:

$$n_{\text{пон}} \leq \sqrt{\frac{375 \cdot 2 \cdot 60 M_{\text{п}} \Delta\theta}{GD^2}} = 212 \sqrt{\frac{M_{\text{п}} \Delta\theta}{GD^2}}. \quad (3)$$

Рассмотрим способ включения тиристоров в статор асинхронного двигателя и устройство управления (УУ) ими, а также логику работы выходных устройств (ВУ). На основе переработки поступающей информации о заданном и истинном состоянии управляемого механизма ВУ должны выдавать сигналы, обеспечивающие работу электропривода в тех выбранных режимах (на тех механических характеристиках), которые обеспечивают быструю и точную обработку программы.

Как известно [Л. 5 и 6], для управления асинхронным двигателем применяется встречно-параллельное включение вентилей, причем для выполнения пуско-тормозных режимов, необходимых в данном случае при управлении от ЦСС, достаточно включить тиристоры только в две фазы. Из-за ничтожно малого падения напряжения в самом тиристоре асимметрии напряжений, питающих двигатель, не наблюдается. Этот вариант включения и был принят (рис. 2).

Устройство управления (УУ) тиристором при работе его в цепях переменного тока должно обеспечивать надежное открывание вентиля каждый раз после прохождения тока через нулевое значение. В отличие от известной схемы управления тиристорами с применением магнитных усилителей

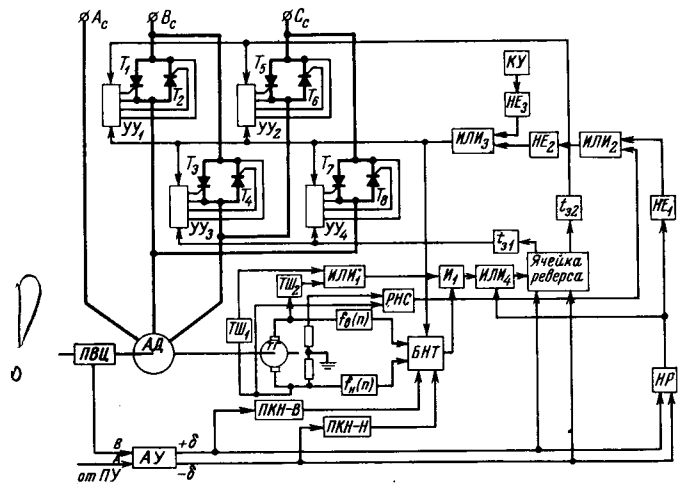


Рис. 2. Схема быстродействующего тиристорного электропривода переменного тока с управлением от цифровой следящей системы (ЦСС).

[Л. 6] нами принято УУ с использованием трансформаторов (рис. 3).

При отсутствии входного сигнала (в случае управления от ЦСС сигнала «0») триод $П1$ закрыт и на вторичных обмотках трансформатора $Tr2$ имеются управляющие напряжения U_{y1} и U_{y2} , что приводит к открытию тиристоров T_1 и T_2 . При подаче отрицательного напряжения на вход УУ (сигнала «1») триод $П1$ открывается, шунтируя первичную обмотку трансформатора $Tr2$, на вторичных обмотках которого отсутствует управляющее напряжение и тиристоры T_1 и T_2 закрыты. Как видно из рис. 3, управляющее напряжение опережает по фазе на 60° напряжение, приложенное к тиристору. Такая схема формирования управляющих сигналов безынерционна, отличается простотой и обеспечивает надежное открывание тиристоров по сигналам от ЦСС при различных режимах работы асинхронного двигателя, что было проверено экспериментально. (Заметим, что в рассматриваемой системе тиристоры выполняют только коммутацию статорных цепей, а регулирования напря-

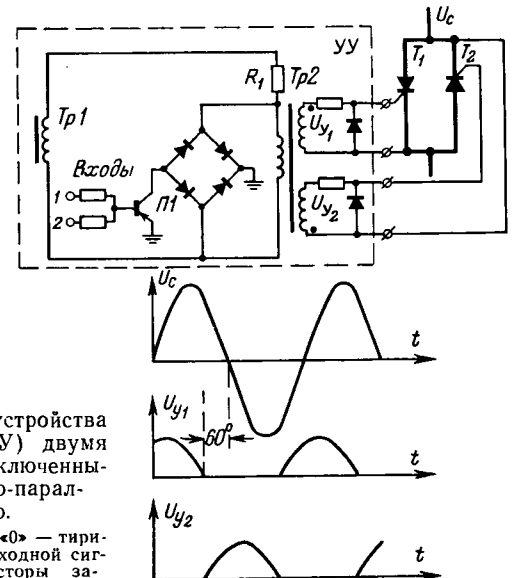


Рис. 3. Схема устройства управления (УУ) двумя тиристорами, включенными встречно-параллельно.

Входной сигнал «0» — тиристоры открыты, входной сигнал «1» — тиристоры закрыты.

жения, подводимого к двигателю, с их помощью не производится.)

Рассмотрим цикл отработки заданной программы (рис. 2). От командного устройства (КУ) поступает команда на отработку (на выходе сигнал «1») и при $\delta \neq 0$ (на выходе ИР сигнал «0») исчезает напряжение (сигнал «0») на выходе схемы ИЛИ₃. При этом с устройств управления УУ всех тиристоров снимается запирающий импульс.

Здесь следует указать, что в схеме имеются две ячейки задержки t_{31} и t_{32} , сигнал «0» на выходе которых исчезает после некоторой выдержки времени, а «1» без задержки проходит с входа ячейки на ее выход. Эти ячейки выполнены на основе триггера Шмидта, причем величина выдержки времени может регулироваться. Необходимость введения ячеек задержки будет пояснена в дальнейшем.

Итак, после снятия запирающего сигнала со всех тиристоров в зависимости от знака δ открываются тиристоры T_1, T_2, T_5, T_6 или T_3, T_4, T_7, T_8 . Так как в начальный момент сигнал на выходе схемы ИЛИ₄ отсутствует и на одном из выходов ячейки реверса [Л. 1] появляется сигнал «0», а на другом «1», двигатель начинает вращаться в нужном направлении. Так, например, при $\delta > 0$ (+ δ , рис. 2) на выходе ячейки t_{31} имеем сигнал «0», а на выходе ячейки t_{32} — «1». Сигнал «0» является открывающим для тиристоров, а сигнал «1» закрывает их, поэтому тиристоры T_3, T_4, T_7, T_8 будут проводить ток, а T_1, T_2, T_5, T_6 останутся запертыми. При разгоне двигателя срабатывает один из триггеров Шмидта ТШ₁ или ТШ₂, выполняющих роль бесконтактных реле скорости, и на выходе ИЛИ₁ появляется напряжение (сигнал «1»). Сигнал «1» появится и на выходе реле нулевой скорости (РНС), представляющего собой триггер Шмидта с высоким коэффициентом возврата. Сигнал «1» появляется на его выходе при скорости $n = (0,02 \div 0,03)n_0$, а сигнал «0» — при $n = 0$. В зависимости от направления вращения на вход БНТ подаются напряжения: 1) пропорциональное рассогласованию с ПКН—В или ПКН—Н; 2) пропорциональное скорости с тахогенератора ТР через один из функциональных преобразователей $f_n(n)$ или $f_n(n)$.

В тот момент, когда тормозной путь становится равным оставшемуся пути перемещения, на выходе БНТ, имеющего релейную характеристику, появляется сигнал «1», что приводит к появлению на выходе схем И₁ и ИЛИ₄ напряжения (сигнал «1»). Появление «1» на выходе схемы ИЛИ₄ вызывает инвертирование сигналов на выходе ячейки реверса; так, если на выходе t_{31} был «0», а на выходе t_{32} — «1», то теперь на выходе t_{31} появится сигнал «1», а на выходе t_{32} — «0». Работающие тиристоры T_3, T_4, T_7, T_8 закрываются, а закрытые ранее T_1, T_2, T_5, T_6 начинают проводить ток. Таким образом, электропривод переходит в режим противоточного торможения.

Так как сигнал со схемы ИЛИ₄ в общем случае может быть подан при любом, отличном от нуля, значении тока, протекающего через работающие тиристоры, то вероятна возможность открывания



Рис. 4. Зависимость пути торможения, выраженного в единицах рассогласования δ , от скорости n . 1 — расчетная; 2 — опытная.

новых тиристоров до закрытия ранее работавших. Для предотвращения таких аварийных режимов двухфазного короткого замыкания (например, через T_3 и T_6) введены ячейки t_{31} и t_{32} . Предусмотрев выдержку времени порядка 0,01 сек, можно избежать межфазных замыканий при самых неблагоприятных случаях включения. Действительно, после появления сигнала на выходе ИЛИ сначала закроются работающие ранее тиристоры T_3, T_4, T_7, T_8 , так как сигнал «1» проходит с входа ячейки t_{31} на выход без задержки, и лишь потом через выдержку времени на выходе t_{32} появится сигнал «0», открывающий тиристоры T_1, T_2, T_5, T_6 .

Противоточным торможением двигатель доводится до скорости $n = 0$, что фиксируется исчезновением выходных сигналов в схемах ИЛИ₁ и РНС. Если после окончания торможения истинное положение механизма равно заданному ($A = B$, $\delta = 0$), то сначала на выходе ИР, а затем на выходе ИЛИ₃ появится сигнал «1». Все тиристоры закрываются; с выхода БНТ снимается сигнал «1». На этом заканчивается цикл отработки программы.

Если после окончания торможения при $n = 0$ $\delta \neq 0$, то производится отработка оставшегося рассогласования до нуля по треугольной скоростной диаграмме следующим образом. Привод снова разгоняется в нужном направлении (в зависимости от знака δ), но при срабатывании одного из триггеров Шмидта ТШ₁ (ТШ₂) появится сигнал «1» на выходе схем И₁ и ИЛИ₁ («1» с выхода БНТ не снимается), и двигатель опять переходит в режим противоточного торможения до скорости $n = 0$. Значение скорости $n_{\text{пон}}$, при которой на выходе ИЛИ₁ появляется сигнал «1», выбирается по формуле (3). При $\delta = 0$ (после корректирования положения механизма) срабатывает ИР; появление на его выходе сигнала «1» приводит к возникновению подобного сигнала на выходе ИЛИ₄, и привод тормозится противотоком до скорости $n = 0$, при которой на выходе РНС появляется сигнал «0». При этом возникает напряжение (сигнал «1») на выходе ИЛИ₃, все тиристоры закрываются, и двигатель отключается от питающей сети.

Экспериментальное исследование описанного следящего привода переменного тока проводилось в лаборатории электропривода Уральского политехнического института. В качестве исполнительного двигателя был использован двигатель МТ-12-6, управляемый тиристорами типа УПВК-50-4 по сигналам, поступающим от ЦСС. Арифметическое устройство ЦСС, состоящее из девятиразрядного сумматора статического типа, преобразователи кода в напряжение, ячейка реверса, ноль-реле, логиче-

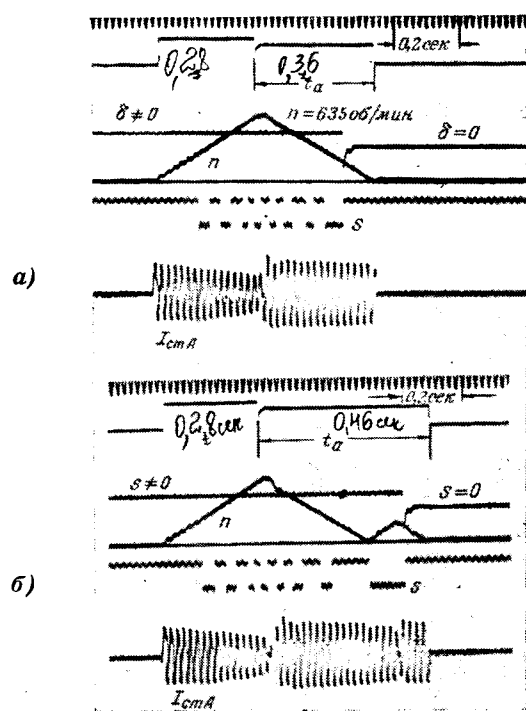


Рис. 5. Осциллограммы обработки $\delta = 16$ ед. при разной настройке БНТ.
а — БНТ настроен оптимально (после торможения при $n=0$ и $\delta=0$); б — БНТ сработал преждевременно (после торможения при $n=0$, $\delta \neq 0$), оставшееся рассогласование электропривод отработал в режиме импульсной доводки.

ские элементы И, ИЛИ, НЕ статического типа выполнены на полупроводниковых триодах и диодах. Обмотки статора двигателя соединены в звезду, линейное напряжение сети $U_{\pi}=220$ в (для предотвращения выхода из строя тириستоров).

При проведении экспериментов значение $\Delta\theta$ принималось равным 0,22 оборота по валу двигателя. Значения $GD_{\Sigma}^2 = 0,6$ кг·м², $M_{ст}=0$, $r_{доб.р}=0$.

Для опытного образца был построен график зависимости $\varphi_{\pi}=f(n)$ по формуле (1), представленный на рис. 4. На этом же рисунке нанесена зависимость, полученная экспериментально путем осциллографирования процесса отработки различных рассогласований. На рис. 4 угол торможения φ_{π} выражен в единицах рассогласования δ , исходя из выбранного значения $\Delta\theta$. С учетом допущений ($M_{ст}=0$, параметры машины постоянны и выбраны

по каталогу, не учтено влияние электромагнитных переходных процессов) сходимость рассчитанных и экспериментальных зависимостей следует считать удовлетворительной.

На рис. 5 приведены осциллограммы отработки рассогласования $\delta=16$ ед. для случая оптимальной настройки БНТ (при $n=0$, $\delta=0$) и преждевременного его срабатывания (при $n=0$, $\delta \neq 0$). На осциллограммах приняты следующие обозначения: t_a — время, в течение которого с выхода БНТ подается сигнал «1», s — ступенчатая кривая (отметчик пути), каждая горизонтальная линия которой соответствует прохождению приводом пути, равного единице рассогласования. $I_{ста}$ — статорный ток фазы А.

Выводы. 1. Проведенные исследования показали целесообразность и перспективность применения тириستоров в силовых цепях асинхронного двигателя, особенно когда следящие приводы работают от выходных устройств ЦСС. Это делает систему управления практически безынерционной и обеспечивает работу электропривода в режимах, создающих возможность быстрой и точной отработки заданных программ.

2. Применение тиристоров позволяет создать в следящих электроприводах интенсивное противоточное торможение со стабильным отключением двигателя при скорости $n=0$. При этом быстродействие тиристоров делает возможным корректировку механизма в положении точной остановки без введения специального режима пониженной скорости, что намного упрощает систему управления приводом.

Литература

1. Бражников Н. В., Бондаренко В. И. и Чистов В. П., Автоматизация доменного и прокатного производства с применением счетно-решающих устройств, Металлургия, 1962.
2. Шубенко В. А. и Браславский И. Я., О применении асинхронных двигателей в следящих системах с цифровым программным управлением, Известия вузов, Горный журнал, 1964, № 5.
3. Шубенко В. А., Вопросы динамики автоматизированных асинхронных электроприводов, «Электричество», 1960, № 1.
4. Коган Б. Я., Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования, Физматгиз, 1963.
5. Булгаков А. А., Основы динамики управляемых вентильных систем, Изд-во АН СССР, 1963.
6. Вешеневский С. Н., Замарев Б. С. и Солдучо Я. Ю., Силовые кремниевые управляемые вентили и их применение в электроприводе, Передовой научно-технический и производственный опыт, № 26-63-62/3, 1963.

[25.5.1964]



О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты

Доктор техн. наук, проф. В. Л. ФАБРИКАНТ

Рига

Постановка вопроса. В настоящее время теория надежности получила широкое применение. Количественное определение надежности дает возможность сравнивать различные варианты устройств и оценивать эффективность мероприятий по повышению надежности.

Представляется очевидной необходимость использовать теорию надежности и для оценки устройств релейной защиты. Такая оценка становится особенно необходимой в настоящее время в связи с внедрением полупроводниковых защит. Имеется ряд принципов выполнения элементов этих защит, из которых должны быть выбраны наиболее эффективные. Такой выбор не может быть правильно сделан без сравнения возможных вариантов и по надежности. Интуитивное определение степени надежности имеет часто субъективный характер. Возникающие разногласия могут быть правильно решены лишь на основе количественного анализа, возможность которого дается теорией надежности. С этой точки зрения представляется вполне правильной и актуальной сделанная в [Л. 1] попытка рассмотреть надежность устройств релейной защиты и способы ее повышения методами современной теории надежности.

В то же время релейная защита, как и некоторые другие аналогичные устройства, имеет особенности, которые должны быть учтены при применении теории надежности. Представляется, что механическое перенесение методов, применяемых, например, для анализа надежности устройств радиосвязи и телевидения, на оценку надежности устройств релейной защиты может привести к неправильным выводам. Представляется, что такие ошибки не избегнуты и в [Л. 1].

Двойкий характер нарушения надежности устройств релейной защиты. Каждое устройство релейной защиты должно, как известно [Л. 2], удовлетворять двум основным требованиям.

1. Не действовать (не давать сигнала на выходе) в случаях, когда данному устройству действовать не следует. Это требование в дальнейшем для сокращения будет именоваться требованием селективности данного устройства.

2. Действовать (давать сигнал на выходе) в случаях, когда данному устройству действовать следует. Это требование будет именоваться в дальнейшем требованием безотказного действия.

Соответственно возможны и два различных случая нарушения надежности. Возможны такие повреждения элементов устройства, которые приводят к нарушению селективности, т. е. к появлению сигнала на выходе при условиях, когда такого сигнала не должно быть. Возможны повреждения, приводящие к отказу защиты, т. е. к отсутствию сигнала на выходе при условиях, когда такой сигнал должен появиться. Эти два случая нарушения надежности необходимо различать. Неправильно

просто просуммировать все случаи нарушения надежности независимо от того, к какой из двух указанных категорий они относятся. Недопустимостью такого суммирования вызывается двумя факторами.

1. Способы резервирования (как устройства релейной защиты в целом, так и отдельных элементов этого устройства), повышающие надежность по селективности, увеличивают вероятность отказа и наоборот.

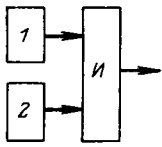
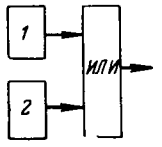
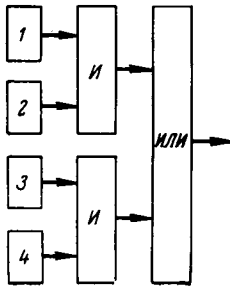
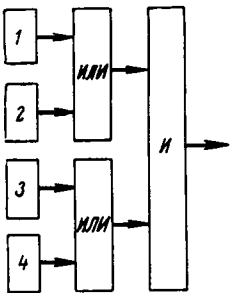
2. При наличии нарушения надежности той или иной категории вероятность неселективного действия и вероятность отказа, а также их экономические последствия различны.

Рассмотрим более подробно каждый из этих факторов. Допустим, что повреждение какого-либо элемента устройства релейной защиты может создать на его выходе излишний сигнал, который способен привести к неселективному действию устройства защиты в целом. Резервирование такого элемента с целью предотвращения неселективного действия может быть осуществлено применением второго такого же элемента, причем сигнал на выходе появляется лишь при одновременном действии обоих элементов (рис. 1 — элементы 1 и 2). Если вероятность появления излишнего сигнала на выходе одного из элементов обозначить через q ($q < 1$) и считать повреждения примененных элементов независимыми друг от друга событиями, то вероятность появления ложного сигнала на выходе схемы рис. 1 будет $q' = q^2$. Поскольку $q^2 < q$, вероятность неселективного действия снижается.

Однако если тот же элемент может получить такое повреждение, при котором возможен его отказ, то схема рис. 1 только увеличивает вероятность этого отказа. Если обозначить вероятность отказа элемента через q_1 , то вероятность появления сигнала на выходе одного элемента будет $p_1 = 1 - q_1$. Соответственно вероятность появления сигнала на выходе каждого из двух элементов, а значит и сигнала на выходе, будет p_1^2 , а вероятность отказа $q'_1 = 1 - p_1^2 = 2q_1 - q_1^2$. Эта вероятность больше, чем вероятность отказа одного элемента ($2q_1 - q_1^2 > q_1$).

Необходимо отметить, что при рассмотрении вероятности неселективного действия или отказа схемы рис. 1 входящий в состав этой схемы элемент И считался абсолютно надежным. Учет возможных повреждений этого элемента привел бы к увеличению вероятности как неселективного действия, так и отказа схемы рис. 1.

Напротив, для уменьшения вероятности отказа следовало бы применить схему рис. 2. Рассуждения, аналогичные приведенным выше, показывают, что вероятность неселективного действия этой схемы $q' = 2q - q^2$, а вероятность отказа $q'_1 = q_1^2$.

| Схема | Вероятность | |
|--|------------------------------|--------------------|
| | неселективного действия q' | отказа q'_1 |
| Отдельный элемент | q | q_1 |
|  <p>Рис. 1</p> | q^2 | $2q_1 - q_1^2$ |
|  <p>Рис. 2</p> | $2q - q^2$ | q_1^2 |
|  <p>Рис. 3</p> | $2q^2 - q^4$ | $(2q_1 - q_1^2)^2$ |
|  <p>Рис. 4</p> | $(2q - q^2)^2$ | $2q_1^2 - q_1^4$ |

Для уменьшения как вероятности неселективного действия, так и вероятности отказа следует применить схему с числом взаимно резервируемых элементов не менее четырех. Возможные варианты такой схемы показаны на рис. 3 и 4.

Вероятности неселективного действия и отказа отдельного элемента и схем рис. 1—4 сведены в таблицу [Л. 3].

Для того чтобы схема рис. 3 имела меньшую вероятность как неселективного действия, так и отказа, необходимо, чтобы

$$q' = 2q^2 - q^4 < q \dots \quad (1)$$

и

$$q'_1 = (2q_1 - q_1^2)^2 < q_1 \dots \quad (2)$$

Из неравенства (1) следует:

$$q^4 - 2q^3 + q = q(q-1) \left(q + \frac{\sqrt{5}+1}{2} \right) \times \left(q - \frac{\sqrt{5}-1}{2} \right) > 0.$$

Так как всегда $q > 0$, $q-1 < 0$ и $q + \frac{\sqrt{5}+1}{2} > 0$, то для выполнения (1) необходимо

$$q < \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0,618. \quad (3)$$

Выигрыш по селективности $k_c = f(q)$ может быть получен как отношение вероятности неселективного действия одного элемента к вероятности неселективного действия схемы рис. 3, т. е.

$$k_c = \frac{q}{2q^2 - q^4} = \frac{1}{2q - q^3}. \quad (4)$$

Зависимость $k_c = f(q)$ дана на рис. 5 (кривая 1). Как видно из рисунка, выигрыш появляется ($k_c > 1$) при $q < 0,618$ и растет с уменьшением q , т. е. с повышением надежности элемента.

Из неравенства (2) следует:

$$q_1^4 - 4q_1^3 + 4q_1^2 - q_1 = q_1(q_1-1) \left(q_1 - \frac{3+\sqrt{5}}{2} \right) \times \left(q_1 - \frac{3-\sqrt{5}}{2} \right) < 0.$$

Так как всегда $q_1 > 0$, $q_1-1 < 0$, $q_1 - \frac{3+\sqrt{5}}{2} < 0$, то для выполнения (2) необходимо

$$q_1 < \frac{3-\sqrt{5}}{2} = 0,382. \quad (5)$$

Выигрыш по уменьшению вероятности отказа k_o может быть получен как

$$k_o = \frac{q_1}{(2q_1 - q_1^2)^2} = \frac{1}{4q_1 - 4q_1^2 + q_1^3}. \quad (6)$$

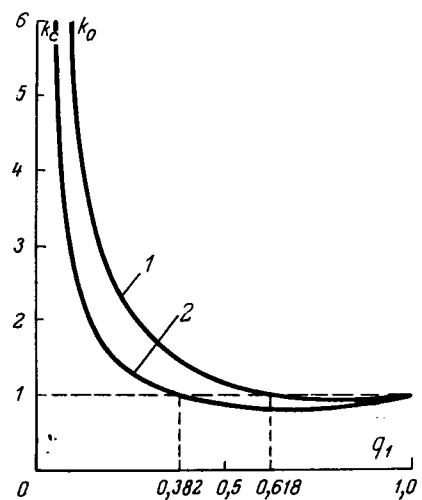


Рис. 5.

Зависимость $k_0 = f(q_1)$ также дана на рис. 5 (кривая 2). Как видно из рисунка, выигрыш появляется ($k_0 > 1$) при $q_1 < 0,382$ и возрастает с уменьшением q_1 , т. е. с повышением надежности элемента.

Для схемы рис. 4, наоборот, зависимость $k_c = f(q)$ выражается кривой 2, а зависимость $k_0 = f(q_1)$ — кривой 1. Значения (3) и (5) известны из [Л. 3].

Таким образом, при низкой надежности элементов ($q > 0,618$ или $q_1 > 0,382$ для схемы рис. 3 и $q > 0,382$ или $q_1 > 0,618$ для схемы рис. 4) одновременное снижение вероятности неселективного действия и отказа при помощи резервирования аналогичными элементами не может быть достигнуто.

При этом в отличие от [Л. 3] вероятности q и q_1 рассматриваются как относящиеся не к данному экземпляру устройства, а как требования, которым должен удовлетворять любой экземпляр. Таким образом, действительная вероятность q_d каждого экземпляра должна удовлетворять условию

$$0 \leq q_d \leq q.$$

При таком понимании вероятности q , даже при $q > 0,5$, элемент нельзя заменять противоположным, как это предлагается в [Л. 3].

Как уже указывалось, учет ненадежности самих логических элементов И или ИЛИ привел бы к увеличению вероятности неселективного действия q' и отказа q'_1 схем рис. 3 и 4. Соответственно возросли бы и требования к надежности элементов, входящих в схему (уменьшились бы допустимые значения q и q_1 , при которых целесообразно резервирование).

В [Л. 1] сделан противоположный вывод об увеличении эффективности резервирования при уменьшении надежности отдельных элементов. Такой вывод получен вследствие неучета двоякого характера нарушения надежности.

В [Л. 4 и 5] рассматривается частный случай двоякого характера нарушения надежности. Рассматривается возможность обрыва или закорачивания сопротивления R_1 , являющегося элементом какого-либо устройства. Резервированием от обрыва является параллельное включение сопротивлений и резервированием от закорачивания — последовательное. Для резервирования на случай любого из этих повреждений необходимо как последовательное, так и параллельное включение элементов (рис. 6 и 7). Вероятности обрыва ($R = \infty$) или закорачивания ($R = 0$) схем рис. 6 и 7 в целом получаются такими же, как для схем рис. 3 и 4 (см. табл. 1).

Однако в [Л. 4 и 5] вероятности обрыва и закорачивания суммируются. Такой подход, правильный для определенной категории устройств, представляется неправильным для устройств релейной защиты. Причина недопустимости такого подхода

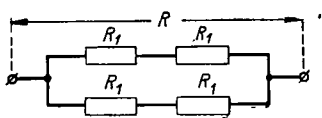


Рис. 6.

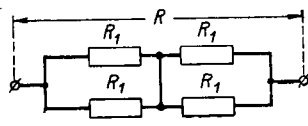


Рис. 7.

заключается в указанной выше неодинаковой вероятности и различных экономических последствиях неселективного действия и отказа устройств релейной защиты.

Различие вероятности и последствий неселективного действия и отказа. В ряде случаев, например в устройствах радиосвязи и телевидения, нарушение работы устройства приводит всегда к одним и тем же последствиям — прекращению функционирования данного устройства. Последствия повреждений не зависят от того, вызвано ли это нарушение обрывом или закорачиванием какого-либо элемента, как это рассматривается в [Л. 4 и 5]. Если нарушается тот канал передачи, который в данный момент используется, то нарушение непосредственно выводит данный канал из действия и никакие дополнительные условия не влияют на вероятность этого выведения.

Релейная защита работает в иных условиях. Если имеет место такое повреждение устройства релейной защиты, которое может привести к отказу защиты в действии, то это еще не значит, что такой отказ действительно произойдет. Для того чтобы отказ произошел, необходимо, чтобы до исправления или замены поврежденного элемента создались условия, при которых данное устройство должно было бы подействовать, т. е. чтобы произошло повреждение защищаемого данным устройством элемента электрической системы.

Таким образом, вероятность отказа связана с совпадением двух (обычно взаимно независимых) событий — повреждением устройства защиты и повреждением защищаемого элемента системы. Соответственно вероятность отказа

$$q_0 = q'_1 q''_1, \quad (7)$$

q'_1 — вероятность такого повреждения устройства, которое может вызвать отказ в действии;

q''_1 — вероятность такого повреждения защищаемого элемента электрической системы, при котором данное устройство должно действовать.

В отличие от этого возможны такие повреждения устройства релейной защиты, которые немедленно, без выполнения дополнительных условий, вызывают его неселективное действие. Однако такие повреждения весьма редки. Обычно устройство защиты действует лишь при срабатывании нескольких основных органов (рис. 8), вероятность одновременного повреждения которых весьма мала. Возможно такое неселективное действие и при повреждении выходных устройств. Однако эти устройства обычно также весьма надежны.

Значительно более вероятно неселективное действие устройства релейной защиты при условиях, когда часть основных органов, от которых зависит действие устройства, должна сработать, и селективность зависит только от одного из них. В этом случае повреждение этого органа может привести к неселективному действию устройства в целом. Так, если в схеме рис. 8 орган 1 поврежден, а создаются условия, при которых органы 2 и 3 должны сработать, защита может подействовать неселективно.

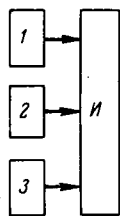


Рис. 8.

Опыт показывает, что большая часть неселективных действий устройств релейной защиты происходит при коротких замыканиях вне зоны действия защиты, т. е. именно при описанных выше условиях.

Если обозначить вероятность повреждений устройств защиты, могущих вызвать немедленное неселективное действие, через q'_2 и могущих вызвать неселективное действие при каких-то внешних условиях через q'_3, q'_4, \dots, q'_n , а вероятность этих внешних условий соответственно через $q''_3, q''_4, \dots, q''_n$, то общая вероятность неселективного действия будет:

$$q_n = 1 - (1 - q'_2)(1 - q'_3 q''_3)(1 - q'_4 q''_4) \dots (1 - q'_n q''_n)$$

или при достаточно малых значениях

$$q'_2, q'_3, q''_3, q'_4 q''_4, \dots, q'_n, q''_n;$$

$$q_n \approx q'_2 + q'_3 q''_3 + q'_4 q''_4 + \dots + q'_n q''_n.$$

Кратко это можно записать как

$$q_n \approx \sum_{m=2}^n q'_m q''_m,$$

где $q''_2 = 1$.

Если приближенно принять $q'_2 \approx 0$ и $q''_3 = q'_4 = \dots = q'_n = q''_n$, то

$$q_n \approx q'' \sum_{m=3}^n q'_m = q' q'', \quad (8)$$

где

$$q' = \sum_{m=3}^n q'_m.$$

Таким образом, вероятность неселективного действия и отказа защиты зависит не только от вероятности повреждения соответствующих элементов самих устройств, но и от внешних условий. Уже в силу одного этого обстоятельства, так как обычно $q'' \gg q'$, нельзя непосредственно складывать вероятности повреждений устройств релейной защиты q'_1 и q' . Кроме того, и ущерб от неселективного действия A_n защиты и от ее отказа A_0 обычно различен.

Конечно, общее математическое ожидание ущерба можно было бы выразить как $A = q' q'' A_n + q'_1 q''_1 A_0$, однако такая оценка требует знания значений q'', q''_1, A_n и A_0 . Все это значительно затрудняет оценку целесообразности резервирования.

Наиболее надежным является такое резервирование, при котором как вероятность повреждений, ведущих к неселективному действию q' , так и вероятность повреждений, ведущих к отказу q'_1 , снижалась бы. Тогда независимо от значений q'', q''_1, A_n и A_0 значение A уменьшается. Именно такие условия и были рассмотрены в предыдущем параграфе.

Определение значения надежности. В [Л. 4, 5 и др.] надежность определяется как вероятность

безотказной работы в течение заданного времени. Это же определение используется и в [Л. 1] уже применительно к устройствам релейной защиты.

В дальнейшем с целью большей простоты изложения будет использоваться значение ненадежности, дополняющее значение надежности до единицы, т. е. вероятность нарушения надежности в течение заданного времени.

Как уже указывалось, величина ненадежности состоит из двух частей — вероятности отказа q_0 и вероятности неселективного действия q_n .

Значения q_0 и q_n могут быть определены по статистическим данным.

Вероятность неселективного действия (или отказа) за некоторый промежуток времени T определяется, как известно, по выражению

$$q_{nT} = 1 - e^{-a_n T}, \quad (9)$$

где a_n — интенсивность неселективных действий. Аналогичное выражение может быть записано и для вероятности отказа.

При достаточно малых значениях $a_n T$ выражение (9) после разложения $e^{-a_n T}$ в ряд и пренебрежения членами, содержащими $a_n T$ во второй и более высоких степенях, приобретает вид:

$$q_{nT} \approx a_n T. \quad (10)$$

Приближенное значение q_{nT} может быть непосредственно определено как отношение числа защит, неселективно действовавших за время T , к общему числу защит.

Так, если в течение года из тысячи защит данного типа три подействовали неселективно и одна отказала в действии, то для годового срока $q_0 \approx 0,001$ и $q_n \approx 0,003$.

Допустим, что с целью уменьшения неселективных действий включаются две одинаковые защиты по схеме рис. 1. Механически применяя законы теории вероятностей, можно было бы предположить, что вероятность неселективного действия такого устройства будет $q_n^2 = 0,003^2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$. Однако такой вывод был бы ошибочным, так как рассматриваемые случаи неселективного действия обеих защит нельзя считать взаимно независимыми.

Как уже указывалось, вероятность неселективного действия зависит от двух факторов — повреждения устройства защиты с вероятностью q' и внешних условий (например, короткого замыкания вне зоны защиты) с вероятностью q'' , когда повреждение устройства защиты может проявиться. Таким образом, как уже указывалось в (8), $q_n = q' q''$.

Если повреждения примененных двух устройств являются взаимно независимыми событиями, то появление внешнего короткого замыкания наступает одновременно для обеих защит.

Таким образом, вероятность повреждения в течение года обеих защит будет q'^2 , а вероятность неселективного действия будет $q'^2 q''^2$, а не $q_n^2 = q'^2 q''^2$. Так, если $q' = 0,03$ и $q'' = 0,1$, то вероятность не-

селективного действия схемы рис. 1 будет $q'^2 q'' = 0,9 \cdot 10^{-4}$, т. е. в 10 раз больше, чем значение q_n^2 .

То же можно сказать и о вероятности отказа.

Поскольку вероятность внешних условий — коротких замыканий в зоне или вне зоны — не зависит от выполнения устройств релейной защиты, то следует при сравнении различных устройств оперировать лишь вероятностями их повреждений, могущих привести к неселективному действию q' или к отказу q'_1 .

Необходимо отметить, что значения q' и q'_1 не могут быть получены непосредственно статистически, так как случаи повреждения устройств защиты, не приведшие к неселективному действию или отказу, остаются, как правило, неизвестными.

Однако эти значения легко могут быть найдены из (7) и (8): $q'_1 = \frac{q_0}{q''_1}$ и $q' = \frac{q_n}{q''}$, так как и вероятности неселективного действия и отказа q_n и q_0 , и вероятности повреждений вне зоны и в зоне q'' и q''_1 могут быть определены по данным статистики.

Естественно, что вероятность повреждения любого элемента устройства защиты сильно зависит от времени T , в течение которого это повреждение может произойти.

Если повреждение элемента может быть обнаружено лишь при очередной проверке, то и за время T в (9) или (10) должно приниматься время между проверками.

Однако это время может быть сильно сокращено, если повреждение элемента будет сигнализироваться. Тем самым резко уменьшается возможность неправильного действия устройства защиты из-за повреждения данного элемента, так как для такого действия необходимо появление соответствующих внешних условий до принятия мер по полученному сигналу. Это время может быть сде-

лано достаточно малым (автоматический вывод защиты через малое время и т. п.).

Однако большое число сигналов усложняет защиту и в свою очередь вносит элемент ненадежности. По-видимому, иногда целесообразно иметь две части защиты, действующие по схеме И, с сигнализацией неисправности каждой из этих двух частей.

Выводы. 1. Для оценки устройств релейной защиты целесообразно применение теории надежности. Однако при этом необходимо учитывать особенности релейной защиты.

2. Резервирование элементов релейной защиты может быть эффективным лишь при достаточной надежности самих элементов. Поэтому выполнение надежных элементов является необходимым условием надежности устройства в целом.

3. При оценке надежности должны учитываться вероятности повреждения элементов устройств. Эту оценку нельзя производить непосредственно по вероятности неселективного действия или отказа устройств.

4. Для повышения надежности устройств защиты иногда целесообразна сигнализация о неисправности каждой из двух частей защиты, действующих по схеме И.

Литература

1. Мамонтов О. В., Методы кибернетики в теории электронных защит, Госэнергоиздат, 1962.
2. Федосеев А. М., Основы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1961.
3. Moore E. F., Shannon J., Reliable circuits using less reliable relays, J. Franklin Inst, 262, № 3, 1956. (Русский перевод в книге «Кибернетический сборник», № 1, 1960).
4. Дружинин Г. В., Надежность устройств автоматики, изд-во «Энергия», 1964.
5. Леонтьев Л. П., Введение в теорию надежности радиоэлектронной аппаратуры, АН Латв. ССР, 1963.

[28.4.1965]



УДК 621.316.925:519.210

О надежности работы устройств релейной автоматики электрических сетей

Кандидат техн. наук Н. М. ЗУЛЬ и инж. Ф. А. КУЛИЕВ
ВИЭСХ

Ряд устройств автоматики (реле защиты, устройства автоматического повторного включения и др.) работает в режиме, когда время их действия исчисляется секундами, а промежутки между рабочими периодами — сотнями часов. Отказы в работе этих устройств могут быть связаны со значительным ущербом. Поэтому вопросы надежности их работы приобретают важное значение.

Неисправность таких устройств вызывается случайными внезапными отказами и отказами, обусловленными ухудшением характеристик их

элементов (ослаблением пружин, увеличением переходного сопротивления контактов и т. д.).

Под отказом понимается полный срыв работы или неудовлетворительная работа систем автоматики. При полном срыве работы надо заменить элемент, который вышел из строя, а при неудовлетворительной работе (характеристики элемента вышли за допустимые пределы) надо произвести настройку (увеличение чувствительности, натяжение пружины, уменьшение переходного сопротивления контактов и т. д.). За показатель надежности

принимается вероятность безотказной работы системы автоматики в течение времени t . Возможности излишних срабатываний не рассматриваются.

Особенности постепенных отказов элементов. Изменение параметров систем в определенной степени зависит от старения элементов, т. е. от физико-химического изменения их структуры. Поэтому постепенные отказы, связанные с медленным случайным изменением одной или нескольких характеристик элементов, зависят от времени работы. Изменения характеристик определяются условиями окружающей среды, где находится элемент, характером работы и т. д. Обычно в первую очередь рассматривают наиболее быстро изменяющийся параметр устройств, который называется определяющим. Определяющие параметры можно рассматривать как случайные величины, которые могут принять любое значение в заданном допуске. Поэтому приходится оценивать вероятность безотказной работы систем за время эксплуатации (t):

$$P(t) = P(R_t \leq R_{t\text{доп}}),$$

где $R_{t\text{доп}}$ — допустимый предел быстро изменяющегося параметра.

Как правило, изменяющиеся параметры устройств являются монотонно возрастающей или убывающей функцией времени t . Очевидно, в этом случае надежность работы устройств в течение интервала времени $(0, T)$ численно равна вероятности того, что устройство будет исправным к моменту T , соответствующему границе рассматриваемого диапазона изменения быстро изменяющегося параметра. Параметры R_t изменяются в течение времени t под воздействием ряда факторов (климатического, механического и т. д.). Во многих случаях можно предполагать, что ни один из этих факторов не доминирует над другими. Тогда согласно теореме Ляпунова закон распределения R_t при любом t близок к нормальному. Указанное подтверждается во многих работах [Л. 1—4 и др.], а также проведенными нами экспериментальными исследованиями (см. ниже).

В рассматриваемом случае вероятность нахождения значений R_t в допустимой области за время эксплуатации устройства с достаточной для практики точностью будет:

$$P_n(t) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{m - R_t}{\sigma}\right). \quad (1)$$

Здесь m — математическое ожидание R_T ;
 σ — среднеквадратичное отклонение от среднего значения R_T ;
 $\Phi(\)$ — функция Лапласа (табулирована).

Следует отметить, что отсчет времени желательно вести с момента выпуска устройства с завода, так как многие элементы автоматики портятся во время хранения на складе и транспортировки. Было установлено, например, что даже при использовании упаковки лучшего качества 10% упакованной аппаратуры оказалось поврежденным [Л. 5].

Особенности внезапных отказов. Как определено в терминологии по надежности [Л. 4 и др.], вне-

запный отказ есть следствие аварии, возникающей в результате скачкообразного изменения значений одного или нескольких основных параметров системы (например, перегорание лампы, пробой конденсатора, короткое замыкание в обмотке дросселей и т. д.). Отказы могут быть зависимые и независимые друг от друга. Мы для упрощения будем полагать, что все отказы независимы. Во многих случаях внезапный отказ может считаться особым видом постепенного отказа. При внезапных отказах в системах автоматики значения параметров резко выходят за допустимые пределы, приближаясь соответственно к нулю или бесконечности.

В [Л. 2, 3 и др.] дана методика проведения расчета надежности при экспоненциальном распределении случайных отказов. Практика показывает, что расчеты вероятностей, выполненные на основании экспоненциального закона, во многих случаях хорошо согласуются с экспериментальными данными.

При этих условиях надежность (P_a) определяется следующим выражением:

$$P_a(t_1, t_2) = \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} \Lambda(t) dt\right], \quad (2)$$

где Λ — интенсивность отказов за время работы в промежутке от t_1 до t_2 .

Таким образом, как показывают проведенные исследования [Л. 1—4 и др.], возникновение внезапных отказов во многих случаях подчиняется экспоненциальному, а постепенных отказов — нормальному закону распределения. Очевидно, что в рассматриваемых устройствах могут происходить одновременно отказы, появление которых подчиняется и экспоненциальному, и нормальному законам распределения. При этом можно считать, что указанные два типа отказов не зависят друг от друга [Л. 1—3]. Поэтому

$$P(t) = P_n(t) P_a(t_1, t_2). \quad (3)$$

Подставляя выражения (1) и (2) в (3), получаем:

$$P(t) = \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{m - R_t}{\sigma}\right)\right] \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} \Lambda(t) dt\right]. \quad (4)$$

Для использования выражения (4) следует определить по данным эксплуатации или статистических испытаний зависимость изменения значений R_t по времени и затем подсчитать значения m и σ . Величины t , t_1 и t_2 находятся на основании технических требований или данных эксплуатации устройств (элементов). Интенсивность отказов (Λ) определяется также по данным статистических испытаний или эксплуатации.

Определение надежности P_n , P_a и P рассматривается ниже на примере релейного устройства двукратного АПВ [Л. 6], статистические испытания которого были нами проведены.

Устройство двукратного АПВ предназначено для работы в комплекте с грузовыми (типа ПГМ-10, УГП) и пружинными (ПП-61 и УПП) приводами, снабженными автоматическим моторным ре-

ветствии с выражением (5) было выбрано равным 4 шт. в каждой из двух выборок соответственно при испытаниях на надежность при постепенных и внезапных отказах. Следует отметить, что в зависимости от экономических соображений минимальное значение U выбирается обычно от 4 до 10 [Л. 7].

Анализ результатов проведенного испытания на срабатывание показывает, что распределение отказов по времени работы и числу срабатываний подчиняется указанным выше закономерностям.

На рис. 2 приведено интегральное распределение отказов в работе устройства двукратного АПВ. Из кривой рис. 2 следует, что за первые 30 мин работы ($6 \cdot 10^3$ срабатываний) происходит наибольшее число отказов ($n=15$). Потом число отказов увеличивается значительно медленнее (за 80 мин до $n=18$), а затем опять возрастает (под «временем работы» подразумевается чистое время срабатывания без пауз). Такой ход кривой довольно широко освещен в литературе по радиоэлектронным приборам и средствам автоматики [Л. 2, 5 и др.].

На рис. 3 приводится зависимость изменения интенсивности отказов (Λ) устройства АПВ при 120-минутной работе ($24 \cdot 10^3$ срабатываний). Как следует из рассмотрения кривой рис. 3, ее можно разбить на три участка: I — 0 ÷ 30 мин ($0-6 \cdot 10^3$ срабатываний), II — 30 ÷ 110 мин ($6 \cdot 10^3-22 \cdot 10^3$ срабатываний), III — свыше 110 мин (свыше $22 \cdot 10^3$ срабатываний). В первый период (I) интенсивность отказов весьма велика, но в то же время резко уменьшается. Это объясняется тем, что вначале элементы имеют относительно большое число внутренних дефектов (скрытые производственные дефекты, некачественное сырье и т. п.). Этот период (I) называется периодом приработки схем («детской смертности»). II период характеризуется примерно постоянной интенсивностью отказов, степень надежности схем в этот период не меняется, он определяет ресурс схемы. После 110 мин или $22 \cdot 10^3$ срабатываний на III участке наступает механический или электрический износ элементов, т. е. кончается ресурс, наступает «старение» эле-

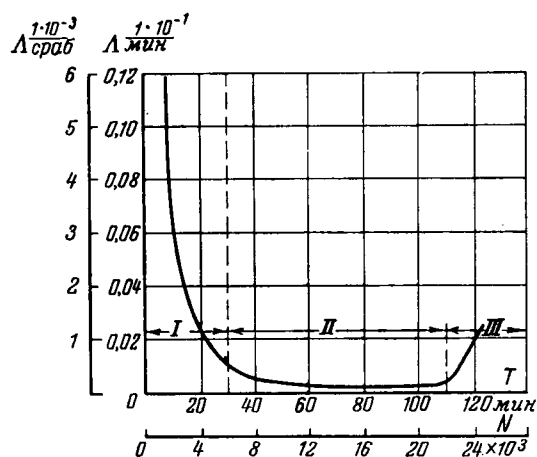


Рис. 3. Интенсивность отказов устройств АПВ по времени работы T (Λ 1/мин) и числу срабатываний N (Λ 1/срабатываний).

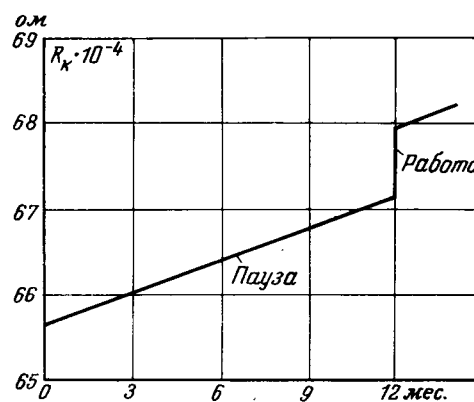


Рис. 4. Изменение переходного сопротивления контактов R_k во время паузы и работы устройств АПВ.

ментов. После II периода эксплуатировать схемы нерентабельно.

Скрытые дефекты можно «выetchь», производя кратковременное статистическое испытание (I участок кривой рис. 3) системы. Если будет произведена такая искусственная приработка, надежность срабатывания в последующей эксплуатации может определяться с учетом данных, полученных после 30-минутной работы или $6 \cdot 10^3$ срабатываний. При этом в качестве кривой суммарной интенсивности отказов Λ может рассматриваться часть графика рис. 3 справа от оси, показанной пунктирной линией. В этом случае, если за основной принять II период, интенсивность отказов оказывается относительно невелика и приблизительно постоянна.

При испытаниях, предназначенных для определения изменения параметров в условиях отсутствия срабатывания, периодически замеряются наиболее быстро изменяющиеся параметры R_t . Если известно, что изменение R_t есть линейная функция времени, то достаточно измерять значения R_t в начале и конце испытаний. Проведенный анализ, при котором сравнивались изменения различных параметров устройства (за период 6 мес.), показал, что практически можно определить только изменение переходного сопротивления контактов реле R_k . Изменения остальных параметров (сопротивления обмоток реле, сопротивления изоляции обмоток, натяжения пружин и т. д.) оказались настолько малы, что их практически трудно было обнаружить (при измерении приборами с классом точности не выше 0,5%). Замер переходного сопротивления контактов был произведен для всех реле в начале и конце испытаний. Для отдельной партии однотипных реле проверялось изменение переходного сопротивления контактов после 6 мес. хранения. График изменения переходного сопротивления во время работы и пауз представлен на рис. 4.

Надежность срабатывания рассматриваемых устройств в период приработки за 10 мин испытаний (t_2-t_1), что равносильно работе схемы в течение 2 лет эксплуатации (см. период I, рис. 3), при следующих данных, полученных в результате статистических испытаний, $R_t=70,4 \cdot 10^{-4}$ Ом, $\Lambda=0,06$ 1/мин, $t=92,0 \cdot 10^{-4}$ Ом, $\sigma=6,4 \cdot 10^{-4}$ Ом будет $P(t)=0,9996 \cdot 0,5488=0,5486$.

Надежность срабатывания после приработки также за период 10 мин работы (см. период II рис. 3 при $R_t=84,8 \cdot 10^{-4}$ Ом,

$m=92,0 \cdot 10^{-4}$ ом, $\sigma=6,4 \cdot 10^{-4}$ ом, $\Lambda=0,0075$ 1/мин, $t_2-t_1=10$ мин) $P(t)=0,8643 \cdot 0,9324=0,8059$.

Как видно из расчета, через 2 года после приработки (всего через 4 года работы) надежность устройств АПВ за счет постепенных отказов уменьшается на 14%. Если после приработки произвести очистку контактов ($R_t=65,6 \cdot 10^{-4}$ ом), то надежность срабатывания за период 10 мин (2 года) работы будет $P(t)=0,9998 \cdot 0,9324=0,9323$.

Среднее время между двумя отказами [Л. 4]

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=n}^n t_i}{n}, \quad (6)$$

где n — число отказов за время испытания;

t_i — время между $(i-1)$ -м и i -м отказами.

а) За период приработки $t_{cp} = \frac{110}{18} = 6,11$ мин.

б) После приработки $t_{cp} = \frac{90}{4} = 22,5$ мин.

Среднее число срабатываний между отказами

$$N_{cp} = \frac{\sum_{i=n}^n N_i}{n}, \quad (7)$$

где N_i — число срабатываний между $(i-1)$ -м и i -м отказами.

а) За период приработки $N_{cp} = \frac{23 \cdot 10^3}{18} = 1,28 \cdot 10^3$ срабатываний.

б) После приработки $N_{cp} = \frac{19 \cdot 10^3}{4} = 4,25 \cdot 10^3$ срабатываний.

Как следует из расчетов, после приработки надежность срабатывания устройства увеличивается примерно на 70% по сравнению с периодом до приработки.

Как указывалось выше, предполагалось, что распределение $P_n(t)$ подчиняется нормальному закону, а $P_0(t_1, t_2)$ — экспоненциальному. Проведенная проверка этих гипотез на основании полученных экспериментальных данных подтвердила их правильность.

Очевидно, статистическому испытанию должны подвергаться только прошедшие контрольные испы-

тания и принятые ОТК устройства. Полученная статистическая информация об отказах в работе устройств может быть в дальнейшем использована при доработках существующих и разработках новых конструкций, при анализе производства и т. п.

В заключение необходимо подчеркнуть следующее.

1. При анализе и оценке надежности устройств автоматики, работающих с большими паузами, необходимо учитывать постепенные изменения параметров во время пауз и внезапные (случайные) отказы при действии устройств.

2. Приведенные данные подтверждают эффективность проведения предварительной приработки (тренировки) устройств автоматики при заводских испытаниях для повышения эксплуатационной надежности этих устройств.

3. Целесообразно сроки ревизий и профилактики (в частности, для релейных устройств сроки чистки контактов) устанавливать, исходя из полученных данных испытания на надежность.

4. Целесообразно провести статистические испытания различных устройств автоматики для определения необходимого цикла предварительной приработки устройств при выпуске их с завода.

Литература

1. Рипс Я. А., Прогнозирование эксплуатационной надежности, Надежность радиоэлектронной аппаратуры, изд-во «Советское радио», 1960.
2. Шор Я. Б., Статистические методы анализа и контроля качества и надежности, изд-во «Советское радио», 1962.
3. Дружинин Г. В., Об исследовании сохранности элементов автоматики, Известия АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, 1959, № 6.
4. Маликов И. М. и др., Основы теории и расчета надежности, Судпромгиз, 1960.
5. Надежность наземного радиоэлектронного оборудования, под редакцией Н. М. Шулейкина, изд-во «Советское радио», 1957.
6. Зуль И. М. и Молоснов Н. Ф., Приставка для двукратного АПВ, «Энергетик», 1963, № 5.
7. Налимов В. В., Применение математической статистики при анализе вещества, Физматгиз, 1960.

[9.2.1965]



УДК 621.316.925:519.21

Подход к расчету надежности устройств релейной защиты¹

Инж. Э. П. СМЕРНОВ

Москва

Введение. Для оценки надежности релейной защиты из-за ряда ее особенностей требуется некоторое развитие методов общей теории надежности.

Отметим следующие из этих особенностей:

1. Общая теория надежности рассматривает главным образом устройства, выполняющие задание непрерывно в течение некоторого более или менее длительного времени от момента включения

до момента прекращения работы. Устройства релейной защиты принадлежат к другому классу устройств. Свои качества, обеспечивающие выполнение задания, они проявляют при внезапно возникающих определенных ситуациях (повреждения защищаемых элементов, ненормальные режимы), когда они должны срабатывать. В течение времени между этими событиями к ним предъявляется противоположное требование — не срабатывать. Поэтому необходимо различать *надежность срабатывания* и *надежность несрабатывания* [Л. 1 и 2].

¹ Тема данной работы предложена доктором техн. наук, проф. А. М. Федосеевым.

Ненадежность защиты может проявляться соответственно в отказе срабатывания или в излишнем срабатывании.

2. Частота отказов и излишних срабатываний устройств защиты определяется не только надежностью самого устройства, но и надежностью защищаемых элементов, их повреждаемостью.

3. Надежность релейной защиты в большей степени, чем надежность целого ряда других современных устройств, зависит от условий эксплуатации. Практика показывает, что значительная часть отказов и излишних срабатываний происходит в результате прямого воздействия окружающих условий или ошибок обслуживающего персонала.

Цель настоящей статьи — наметить подход к решению основных задач оценки надежности устройств релейной защиты с учетом перечисленных выше ее особенностей, без претензии на полноту разработки затронутых вопросов. Автор не избегал пояснений некоторых известных положений, учитывая, что статья предназначена в основном для специалистов в области релейной защиты, в которой методы теории вероятностей почти не применялись.

До рассмотрения конкретных задач остановимся на том представлении о понятии «надежность», которое является исходным для данной работы. Наиболее удачными и общими представляются определения основных понятий теории надежности, приведенные в [Л. 3], где надежность определяется как свойство системы, обусловленное ее безотказностью, долговечностью и ремонтпригодностью и обеспечивающее нормальное выполнение заданных функций. В [Л. 3] также допускается наиболее распространенное в литературе и, в частности, принятое в данной статье употребление термина «надежность» в узком смысле, когда он связывается только с безотказностью. При этом в рассматриваемых определениях термин «безотказность» применительно к большинству устройств релейной защиты следует читать как «безотказное срабатывание и отсутствие излишнего срабатывания» (см. выше).

Основная мера надежности срабатывания. Вероятность отсутствия отказов в срабатывании $R_T(x)$ в течение времени $T(x$ — событие, состоящее в том, что устройство сработало), соответствующая общепринятой мере надежности [Л. 4 и др.], не может служить основной характеристикой надежности срабатывания релейной защиты из-за недостатков, присущих этой величине. Эти недостатки связаны с отмеченными во введении особенностями защиты и заключаются в следующем.

1. Рассмотрим случай, когда требуется сопоставить выполнение с точки зрения надежности срабатывания двух устройств защиты, установленных на линиях с различной повреждаемостью. Предположим, что защита на более надежной линии в течение времени наблюдения отказывала редко, а защита на более повреждаемой — значительно чаще. Ясно, что несмотря на меньшую частоту отказов во времени первой защиты вывод о ее более удачном выполнении делать нельзя, поскольку она должна срабатывать значительно реже, чем первая. Веро-

ятность $R_T(x)$ не дает непосредственного представления о надежности выполнения устройства и характеризует скорее совокупную надежность работы защищаемого элемента и устройств защиты.

2. Устройства защиты одного и того же типа работают часто в резко различающихся условиях. Различаются уровень эксплуатации в отдельных системах и на предприятиях одной и той же системы, организационные формы обслуживания, объективные условия, такие, как климат, окружающая обстановка. Различны сроки службы устройств, охваченных одним рядом наблюдений. В связи с этим показатели надежности, полученные на основе обработки статистических наблюдений, по-видимому, будут сильно зависеть от тех условий, в которых проводится наблюдение. Данные по одной системе могут разойтись с данными по другой системе, а распространение обобщенных показателей по СССР на частные условия едва ли будет обоснованным. Поэтому особое значение имеет оценка надежности в определенных, например лабораторных, условиях на основе многократных испытаний. Это открывает целый ряд возможностей:

а) можно получить такие показатели, которые могли бы характеризовать качество выполнения устройства с точки зрения надежности;

б) можно изучить влияние различных условий на работу устройства;

в) сопоставление указанных показателей надежности с данными эксплуатации, возможно, поможет изучить с вероятностной точки зрения ту составляющую числа отказов, которая привносится условиями эксплуатации (см. ниже);

г) показатели надежности отдельных реле, полученные в лабораторных условиях, могут быть использованы (с поправками на влияние эксплуатации) как исходные при проектировании схем.

Однако проведение лабораторных испытаний для оценки величины $R_T(x)$ в целях, указанных в пп. «а»—«г», затруднительно ввиду необходимости моделирования потока повреждений на защищаемом элементе (методом Монте-Карло).

3. Величина $R_T(x)$ крайне неудобна для расчета надежности схемы защиты по исходным показателям надежности ее элементов, так как для этого придется:

учитывать в показателе надежности каждого пускового и измерительного органа схемы вероятности возникновения повреждений на защищаемом элементе тех видов, на которые реагирует схема;

учитывать различие в состояниях схемы при повреждениях каждого из отмеченных видов.

Более четкой и естественной мерой надежности срабатывания может служить вероятность безотказного срабатывания $R_N(x)$ при последовательности N таких коротких замыканий, при которых требуется срабатывание устройства (или N испытаний на срабатывание). Величина $R_N(x)$ может быть названа *готовностью* устройства к срабатыванию. Она не имеет рассмотренных недостатков величины $R_T(x)$. Кроме того, необходимо отметить, что определение закона распределения путем обработки статистического материала для числа без-

отказных срабатываний (N) проще, чем для времени безотказной работы (T).

Для определения $R_N(x)$ необходимо разработать математическую модель изучаемых событий. В подобных задачах обычно неизбежна идеализация действительности.

Понятие *надежность* относится ко всей совокупности устройств данного типа. Однако с некоторым приближением о надежности рассматриваемой совокупности можно, по-видимому, судить по данным об одном экземпляре, если предположить, что после каждого отказа производится восстановление свойства надежности. Такой переход от совокупности к экземпляру наглядно выявляет соответствие изучаемых событий определенной вероятностной схеме, которую затем можно распространить на партию устройств.

На основании аналогии с другими автоматическими устройствами [Л. 4 и др.] можно предположить, что в начальный период работы или испытаний вновь изготовленного устройства защиты отношение числа его отказов ко всем случаям, когда оно должно срабатывать (частота отказов), может иметь повышенное значение. На этой стадии (приработка) выявляются дефекты. Затем устанавливается приблизительно неизменная частота отказов (стадия нормальной работы). Начиная с некоторого испытания, частота отказов снова возрастает. Эту стадию обычно называют стадией износа. Несколько условно термин «износ» можно использовать и применительно к релейной защите, имея в виду, что устройство защиты подвергается внезапным и резким изнашивающим воздействиям при коротких замыканиях, а в периоды между короткими замыканиями испытывает постоянное подтачивающее воздействие внешних условий, например подведенных к устройству электрических величин.

Стадия приработки при высоком качестве проектирования и изготовления устройства, а также при квалифицированной наладке может быть выражена слабо или может отсутствовать. На стадии износа эксплуатация устройства нецелесообразна. Поэтому наибольший интерес представляет средняя стадия, на которую в основном и обращается внимание в данной работе. На этой стадии преобладают отказы по случайным причинам, и для нее вероятность отказа p при каждом испытании на срабатывание с точностью, удовлетворительной для большинства проектных и эксплуатационных задач, может быть принята неизменной.

Для определения вероятности безотказного срабатывания $R_N(x)$ устройства защиты при последовательности N коротких замыканий воспользуемся тем, что работа отдельного устройства защиты на стадии нормальной работы может рассматриваться как схема Бернулли. Схема Бернулли [Л. 5 и др.] представляет собой последовательность взаимно-независимых испытаний (в нашем случае — таких коротких замыканий, при которых устройство должно сработать), когда в каждом испытании вероятность некоторого события x (в данном случае — срабатывания устройства) равна p независимо от номера испытания.

Схему Бернулли можно получить и в том случае, если рассматривать не экземпляр устройства, а партию устройств одного возраста и с одинаковой наработкой. При этом можно освободиться от предположения, что после отказа надежность полностью восстанавливается, т. е. получить более строгие результаты. Для этого каждое устройство из выборки достаточного объема должно подвергаться многократным испытаниям. Затем отдельные ряды наблюдений располагаются в единый ряд, который и можно рассматривать как схему Бернулли. Если $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ — срабатывание соответственно в 1, 2, 3, ..., N испытаниях, то составное событие, состоящее в срабатывании во всех N испытаниях, равно:

$$x = \prod_{i=1}^N x_i. \quad (1)$$

Поэтому:

$$R_N(x) = p^N. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что при принятых допущениях для определения $R_N(x)$ достаточно определить вероятность безотказного срабатывания устройства p при данном испытании (коротком замыкании, когда устройство должно сработать).

Поскольку проведение слишком большого числа испытаний или организация слишком длительных статистических наблюдений вызывает серьезные трудности, важно решить следующие две задачи:

1) с какой степенью точности частота срабатывания μ/n можно принять за p при данном числе испытаний n ;

2) каково наименьшее число испытаний n , при котором можно принять $\frac{\mu}{n} = p$ при заранее обусловленных требованиях к точности результата.

Для иллюстрации покажем один из приемов постановки испытаний, вытекающий из известного метода доверительных интервалов, который заключается в следующем. На основе соотношений схемы Бернулли по известным μ и n определяется нижний предел p_1 и верхний предел p_2 диапазона, в который с вероятностью β (обычно в процентах) попадает истинная вероятность p . С увеличением числа испытаний n этот диапазон, называемый доверительным интервалом, сужается. Например, в [Л. 6] приводятся таблицы 95 и 99% доверительных интервалов. По данным этих таблиц можно определить наименьшее число испытаний n , требуемое для того, чтобы с вероятностью, не меньшей β , частота μ/n отклонялась от вероятности p не более чем на α , т. е. определить n , удовлетворяющее условию:

$$P\left(\left|\frac{\mu}{n} - p\right| \leq \alpha\right) \geq \beta. \quad (3)$$

На рис. 1 показана зависимость $n = f(p)$, удовлетворяющая условию (3), построенная автором данной статьи по таблице 95% доверительных интервалов при $\alpha = 0,03$ ($\frac{\mu}{n} - p_1 \leq \alpha$ и $p_2 - \frac{\mu}{n} \leq \alpha$).

Из рис. 1 видно, что в самом неблагоприятном случае потребуется иметь $n = 1070$ наблюдений.

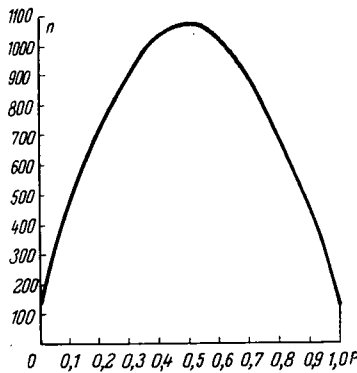


Рис. 1. Кривая для ориентировочной оценки требуемого числа испытаний.

Объем наблюдений можно значительно уменьшить, если удачно наметить предполагаемую вероятность, например, на основании небольшой предварительной серии наблюдений.

Расчет $R_T(x)$ при проектировании. Все сказанное, конечно, не означает, что величина $R_T(x)$, характеризующая совокупную надежность защиты и защищаемого элемента, не представляет интереса. Эта величина, например, может оказаться полезной при разработке требований к надежности защиты в зависимости от повреждаемости системы, при выявлении оптимального соотношения между надежностью срабатывания и надежностью несрабатывания.

Проектирование устройств релейной защиты может поставить задачу предварительной оценки $R_T(x)$ для устройства, помещаемого в определенные условия работы. Эта задача может быть решена, если для проектируемого устройства известна готовность $R_N(x)$ и имеются статистические или другие данные о повреждаемости участка, на котором будет установлено устройство.

Разработаем математическую схему событий применительно к поставленной задаче. Для этого введем следующие ограничительные предположения, приемлемые для практических целей.

1) Все короткие замыкания, при которых проектируемое устройство должно срабатывать, могут быть четко разграничены на i видов.

2) Вероятность $p^{(j)}$ безотказного срабатывания при j -м виде короткого замыкания в каждом случае этого короткого замыкания неизменна. Это значит, что предыдущая история системы не имеет значения для поведения устройства защиты при данном коротком замыкании, так как отказы могут вызываться только случайными причинами. При этом отказы износного характера не учитываются.

Безотказное срабатывание за время T состоит в безотказном срабатывании при коротких замыканиях вида 1, 2, ..., j , ... и i . Поэтому:

$$R_T(x) = \prod_{j=1}^i R_T^{(j)}(x). \quad (4)$$

Для определения каждой из величин $R_T^{(j)}(x)$ воспользуемся известным [Л. 4 и др.] выражением для вероятности отсутствия отказов за время T :

$$R_T^{(j)}(x) = \exp \left[- \int_0^T \lambda_0^{(j)}(T) dT \right], \quad (5)$$

где $\lambda_0^{(j)}(T)$ — мгновенная интенсивность отказов при j -м виде короткого замыкания, которая определяется формулой

$$\lambda_0^{(j)}(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q_{\Delta T}^{(j)}(\bar{x})}{\Delta T}. \quad (6)$$

В выражении (6): \bar{x} — событие, состоящее в том, что устройство не сработало;

$Q_{\Delta T}^{(j)}(\bar{x})$ — вероятность того, что в интервале времени ΔT произойдет отказ устройства.

$Q_{\Delta T}^{(j)}(\bar{x})$ можно найти по формуле произведения вероятностей:

$$Q_{\Delta T}^{(j)}(\bar{x}) = K^{(j)} Q^{(j)}(\bar{x}/k), \quad (7)$$

где $K^{(j)}$ — вероятность возникновения короткого замыкания j -го вида в интервале времени ΔT ;

$Q^{(j)}(\bar{x}/k)$ — условная вероятность отказа при j -м коротком замыкании (при условии, что это короткое замыкание произошло).

Из выражений (4) — (7) с учетом того, что $Q^{(j)}(\bar{x}/k) = (1 - p^{(j)})$, получим следующее выражение, которое можно назвать «формулой предсказания надежности за время T »:

$$R_T(x) = \exp \left[- \sum_{j=1}^i (1 - p^{(j)}) \cdot \int_0^T \lambda_k^{(j)}(T) dT \right], \quad (8)$$

где $\lambda_k^{(j)}(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{K^{(j)}}{\Delta T}$ — интенсивность коротких замыканий j -го вида.

Для ряда элементов системы, например, для генератора и кабельной линии, по-видимому, можно принять $\lambda_k^{(j)}(T) = \text{пост.}$ При этом существенно упрощаются расчеты по выражению (8) и обработка статистического материала о повреждаемости элемента. Однако повреждаемость воздушных линий заметно зависит от времени года, поэтому указанное предположение для них неверно.

Более обоснованно следующее допущение, также ведущее к упрощению. Зависимость $\lambda_k(T) = f(T)$ разбивается на участки так, что в пределах каждого из этих участков можно принять $\lambda_{kl}(T) = \text{пост} = \lambda_{kl}$, где l — номер участка. Тогда:

$$\int_0^T \lambda_k^{(j)}(T) dT = \sum_{l=1}^L \lambda_{kl}^{(j)} T_l. \quad (9)$$

Мера надежности несрабатывания. Излишнее срабатывание возможно двоякого рода: а) в нормальном режиме работы системы по причинам, не связанным с изменением электрических величин, на которые реагирует защита, и б) при возникновении ненормального режима (перегрузки, качания) или внешнего короткого замыкания, когда ряд элементов схемы находится под воздействием электрических величин, отличающихся от нормальных, и часть из них должна изменить свое положение.

В первом приближении вероятность отсутствия излишних срабатываний в нормальном режиме (по п. «а») за время T для большинства практических задач (за исключением ряда специальных случаев, например при проектировании устройств резервирования при отказе выключателей) может быть принята $R_{Tн}(x) = 1$.

Предполагается, что режимы и внешние короткие замыкания по п. «б» могут быть разграничены на i видов. Каждая из вероятностей отсутствия излишнего срабатывания $R_N^{(i)}(\bar{x})$ при последовательности N режимов или внешних коротких замыканий j -го вида по п. «б» может быть названа готовностью несрабатывания в соответствующих условиях и должна исследоваться на основании тех же приемов, что и величина $R_N(x)$, рассмотренная выше.

Что касается вероятности отсутствия излишнего срабатывания устройства за время T , то она определяется выражением

$$R_T(\bar{x}) = R_{Tн}(\bar{x}) \prod_{i=1}^i R_T^{(i)}(\bar{x}). \quad (10)$$

Величину $\prod_{i=1}^i R_T^{(i)}(\bar{x})$ можно представить в виде, аналогичном выражению (8).

Учет условий эксплуатации. Рассмотрим интересную возможность количественной оценки уровня эксплуатации, которая значительно облегчается введением понятия *готовность* (срабатывания или несрабатывания).

Технические требования на проектирование и изготовление устройства соответствуют идеализированной модели тех реальных условий, в которых устройству предстоит работать. Если провести в лаборатории испытания устройства на надежность в соответствии с техническими требованиями, то полученные в этих условиях готовности $R_{Nв}(x)$ и $R_{Nв}(\bar{x})$ могут рассматриваться как меры *надежности выполнения* устройства. Чем ближе лабораторные условия испытаний к той модели действительности, которая является исходной для проектирования устройства, тем истиннее это утверждение.

Готовности $R_{Nэ}(x)$ и $R_{Nэ}(\bar{x})$, определенные в условиях эксплуатации, будут, очевидно, отличны от соответствующих $R_{Nв}(x)$ и $R_{Nв}(\bar{x})$. Отношение готовностей срабатывания или несрабатывания

$$\frac{R_{э}}{R_{в}} = \Theta \quad (11)$$

можно использовать как показатель уровня эксплуатации. Как правило, $\Theta < 1$, и в этом случае смысл величины Θ — вероятность отсутствия неправильных действий из-за дополнительных причин в результате перехода от лабораторных условий к условиям эксплуатации.

Чем выше культура эксплуатации, тем больше Θ . Конечно, не все дополнительные отказы можно непосредственно поставить в вину обслуживающему персоналу. Значительная часть их определяется объективными условиями, окружающей обстановкой. Тем не менее в понятие куль-

туры эксплуатации входит не только квалификация персонала и совершенство организационных форм обслуживания, но и объективные условия работы, которые также должны постоянно улучшаться.

В процессе эксплуатации возможны случаи допущения неправильных действий, которые более целесообразно учитывать в $R_{в}$, а не в Θ . Это отказы из-за неудовлетворительного выполнения защиты по причинам, не выявленным при лабораторных испытаниях. Сюда же относятся случаи отказов из-за переходных сопротивлений, превышающих расчетные, и излишние срабатывания в обстоятельствах, намеренно не учитываемых при проектировании в целях упрощения устройств. Так, понятия чувствительность и селективность защиты поглощаются более общим понятием надежность. Чувствительность защиты можно рассматривать как одну из сторон надежности срабатывания, а неселективность — ненадежности несрабатывания.

Расчет надежности схем защиты по известным показателям надежности ее элементов. Определение R_T (срабатывания и несрабатывания) схемы приводит к громоздким и нечетким решениям. Более целесообразно оценивать R_N схемы. Для этого сложное событие срабатывания схемы x или несрабатывания \bar{x} должно быть выражено через элементарные события — состояния отдельных элементов. Переходя от событий к их вероятностям, получим готовность R_N схемы для каждого вида короткого замыкания.

В литературе имеются рекомендации [Л. 4 и др.] исходить при расчете надежности схем из формулы полной системы событий, представляющей дизъюнкцию (логическое сложение) всех возможных взаимоисключающих состояний схемы, образующих определяемое событие на выходе. Каждое из слагаемых является конъюнкцией (логическое умножение) состояний всех элементов схемы для одной из комбинаций этих состояний. Для оценки этого приема рассмотрим его использование для расчета надежности логической части схемы с контактными реле. Пусть на рис. 2 1—6 — контакты отдельных реле. В целях упрощения изложения соединения схемы будем считать идеально надежными.

Формула полной системы событий, дающих сложное событие x для этой схемы, состоит из 49 слагаемых, каждое из которых содержит шесть сомножителей. Такая же формула для \bar{x} состоит из 15 слагаемых. Общее число слагаемых в обеих формулах равно 2^h , где h — число контактов в схеме. Ясно, что даже для такой сравнительно простой схемы, как та, что изображена на рис. 2, рассматриваемый прием предполагает чрезмерно большой объем расчетов, резко увеличивающийся с увеличением h .

При анализе логической части схем релейной защиты можно получить значительную экономию расчетов, поскольку для этих схем оказывается, как правило, возможным непосредственно записать минимизированные функции алгебры логики. Эти функции представляют различные суперпозиции дизъюнкции совместимых событий (знак \vee), конъюнкции и отрицания.

При условии, что соединения схемы идеально надежны и состояния реле взаимонезависимы, для схемы рис. 2 получим:

$$x = (x_1 V x_2 V x_3) (x_4 V x_5 V x_6); \quad (12)$$

$$\bar{x} = (\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3) V (\bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_6), \quad (13)$$

где x_1, x_2, \dots, x_6 — срабатывание реле соответственно 1, 2, ..., 6;

$\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_6$ — несрабатывание этих реле.

Заметим, что в ряде случаев удобно переходить от выражения для x к выражению для \bar{x} , применяя теорему де Моргана [Л. 7 и др.].

Исходя из выражения (12), можно определить $R(x)$ для интересующих условий. Следует предварительно выписать ряд, характеризующий состояния отдельных элементов схемы и соответствующий правильному поведению всех элементов в данных условиях, например: $x_1, x_2, \bar{x}_3, x_4, \bar{x}_5, x_6$.

Если в этом ряду и в (12) реле отражено одинаковым состоянием x_h , то в формуле для $R(x)$ следует учитывать вероятность безотказного срабатывания r_h этого реле. Если в ряду стоит \bar{x}_h , а в (12) — x_h , то в формуле для $R(x)$ следует учитывать вероятность излишнего срабатывания реле q_h :

$$R(x) = [1 - (1 - r_1)(1 - r_2)(1 - q_3)] \times \\ \times [1 - (1 - r_4)(1 - q_5)(1 - q_6)]. \quad (14)$$

Расчет $R(x)$ по выражению (14) прост и не идет ни в какое сравнение с расчетом суммы из 49 слагаемых, состоящих из шести сомножителей.

Определим вероятность отсутствия излишнего срабатывания схемы для режима, в котором реле должны занимать следующие состояния:

$$\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, x_4, x_5, x_6.$$

$$R(\bar{x}) = 1 - (1 - \bar{r}_1 \bar{r}_2 \bar{r}_3)(1 - \bar{q}_4 \bar{q}_5 \bar{q}_6), \quad (15)$$

где \bar{r}_h — вероятность отсутствия излишнего срабатывания реле h ;

\bar{q}_h — вероятность отказа реле h в рассматриваемом режиме.

Если принять $r_h = \bar{r}_h = 0,9$ и $q_h = \bar{q}_h = 0,1$, то по выражениям (14) и (15) получим $R(x) = 0,911$ и $R(\bar{x}) = 0,729$.

Однако могут встретиться схемы, которые не поддаются методу непосредственного использования минимизированных функций. В этих случаях может быть применен следующий искусственный прием, дающий резкое сокращение объема расчетов по сравнению с выписыванием дизъюнкции всех слагаемых. Формулу полной системы событий для составного события x , как известно, можно представить в следующем компактном виде:

$$x = Y_x x_i + Y_{\bar{x}} \bar{x}_i, \quad (16)$$

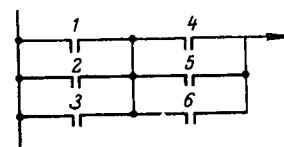
где x_i — срабатывание элемента i схемы;

\bar{x}_i — несрабатывание элемента i ;

Y_x — функция для события x при условии, что элемент i сработал;

$Y_{\bar{x}}$ — функция для события x (срабатывание схемы) при условии, что элемент i не сработал.

Рис. 2. Пример логической части схемы защиты.



Сущность рассматриваемого приема состоит в таком выборе элемента i , относительно которого записывается выражение (16), чтобы функции Y_x и $Y_{\bar{x}}$ можно было бы непосредственно представить как минимизированные.

В некоторых редких случаях может потребоваться рассмотрение комбинаций состояний более чем одного элемента, и тогда соответствующее выражение для x будет содержать более чем два слагаемых. При наличии в логической части схемы защиты элементов с задержками можно рассматривать отдельные такты работы схемы и учитывать вероятности того, что элемент сработает с требуемым замедлением.

Закключение. 1. Для оценки надежности релейной защиты представляется необходимым:

- а) развитие общих методов теории надежности;
- б) проведение специальных наблюдений за поведением защит в условиях эксплуатации;
- в) организация лабораторных испытаний устройств защиты на надежность.

2. Из проблем этого направления, ждущих решения, необходимо отметить следующие:

- а) определение результирующей надежности, учитывающей как надежность срабатывания, так и надежность несрабатывания;
- б) выявление оптимальных требований к надежности срабатывания и надежности несрабатывания;

в) разработка методов повышения надежности схем релейной защиты.

3. Введение понятия «готовность» для устройств защиты позволяет решить ряд задач.

4. Применение минимизированных функций алгебры логики значительно упрощает расчет надежности схем защиты.

Литература

1. Федосеев А. М., Основы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1961.
2. Международный электротехнический словарь, группа 16, Релейная защита, Русское издание под редакцией А. М. Федосеева, Физматгиз, 1960.
3. Надежность технических систем и изделий, Основные понятия, терминология (вып. 67а), изд-во «Наука», 1965.
4. Сапожников Р. А., Бессонов А. А. и Шоломицкий А. Г., Надежность автоматических управляющих систем, изд-во «Высшая школа», 1964.
5. Гнеденко Б. В., Курс теории вероятностей, Физматгиз, 1961.
6. Дунин-Барковский И. В. и Смирнов Н. В., Теория вероятностей и математическая статистика в технике (общая часть), ГТТИ, 1955.
7. Поспелов Д. А., Логический анализ и синтез схем, изд-во «Энергия», 1964.

[29.1.1965]

Регулирование напряжения в системе транзисторный инвертор — асинхронный двигатель

Кандидат техн. наук О. И. ХАСАЕВ и кандидат техн. наук О. А. КОССОВ

Москва

Транзисторные инверторы могут применяться совместно с асинхронным двигателем в системах со стабилизированной или регулируемой частотой. При этом, как правило, необходимо изменять выходное напряжение инвертора: в первом случае из-за колебаний напряжения сети, во втором — для обеспечения экономичного регулирования.

При помощи транзисторных инверторов можно реализовать два способа регулирования выходного напряжения: амплитудный и широтный. Целью настоящей статьи является определение эффективности каждого из указанных способов регулирования.

При амплитудном способе управления форма выходного напряжения и его гармонический состав неизменны. Недостатком этого способа является необходимость применения на входе инвертора дополнительного регулятора напряжения [Л. 1] и фильтра, которые должны быть рассчитаны на полную мощность. Таким образом, здесь дублируется установленная мощность силовых полупроводниковых приборов.

Указанный недостаток можно ликвидировать при использовании широтного способа регулирования, при котором изменение выходного напряжения осуществляется в силовом каскаде инвертора [Л. 2 и 3]. В этом случае изменяется интервал между импульсами напряжения на нагрузке, подключенной к выходу инвертора.

Рассмотрим принципы реализации широтного управления.

В схеме двойного трехфазного моста выходной каскад инвертора выполняется в виде двух обычных трехфазных мостовых схем на транзисторах $T_1 \div T_6$ и $T'_1 \div T'_6$ соответственно (рис. 1). Система управления двойным мостом состоит из шести мультивибраторов, соединенных в две группы: $MB1, MB2, MB3$, образующих один трехфазный задающий генератор, и $MB1', MB2', MB3'$ — второй, причем ведущий мультивибратор второго генератора — $MB1'$ синхронизирован с ведущим мультивибратором первого генератора магнитным усилителем $MU4$ подобно тому, как это сделано в широтно-импульсном модуляторе на симметричных мультивибраторах [Л. 1]. При помощи магнитного усилителя $MU4$ выходные напряжения мультивибраторов второго генератора могут быть сдвинуты относительно напряжений первого генератора в пределах $0 \leq \alpha \leq \pi$ (рис. 2). Тогда интервал времени, когда напряжение на нагрузке равно нулю, определится (рис. 2, в) углом

$$\beta = \frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$

Эффективное значение выходного напряжения инвертора будет равно:

$$U_n = U_n \sqrt{1 - \frac{2\beta}{\pi}}. \quad (2)$$

При широтном регулировании может быть использован также обычный трехфазный мост (рис. 3). Схема управления им также состоит из двух трехфазных генераторов, у которых фазы выходных напряжений (рис. 2, а и б) сдвигаются при помощи магнитного усилителя. Каждая пара силовых транзисторов, включенная последовательно между клеммами источника питания, управляется в противофазе одной парой мультивибраторов $MB1, MB1', MB2, MB2'$ и $MB3, MB3'$. Запирание транзисторов во время пауз управляющего напряжения осуществляется через выпрямители обмотками мультивибраторов, соединенными встречно (рис. 3).

Таким образом, если фаза выходных напряжений $MB1$ и $MB1'$ совпадает ($\alpha = 0$), то порядок переключения силовых транзисторов будет таким же, как и в обычной мостовой схеме. Если $\alpha \neq 0$, то транзисторы переключаются с запаздыванием на угол α .

Для получения полного диапазона регулирования выходного напряжения в этой схеме угол α достаточно изменить в пределах $0 \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{3}$, так как в трехфазном мосте каждая пара транзисторов управляется со сдвигом фазы на $\frac{\pi}{3}$ независимо от величины α . В этом случае углы α и β будут связаны следующим соотношением:

$$2\beta = \frac{\pi}{3} + \alpha. \quad (3)$$

С изменением угла α изменяется не только величина, но и форма выходного напряжения, причем это изменение зависит от характера нагрузки. Если $0 < \alpha \leq \frac{\pi}{3}$, то при активной нагрузке форма линейного напряжения на выходе имеет вид, приведенный на рис. 2, ж. Здесь в отличие от случая, когда $\alpha = 0$, появляется дополнительная ступень мгновенного значения напряжения.

Эффективное значение линейного напряжения равно:

$$U_n = U_n \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\beta}{\pi}}. \quad (4)$$

В интервале $\pi/3 \leq \alpha \leq 2\pi/3$ форма выходного напряжения вновь изменяется (рис. 2, к), а его эффективное значение определяется по формуле

$$U_n = U_n \sqrt{1 - 3\beta/\pi}. \quad (5)$$

Величина фазного напряжения в зависимости от β определяется по формулам (4) и (5) с учетом коэффициента $\frac{1}{\sqrt{3}}$.

Рассмотрим работу схемы при индуктивно-активной нагрузке, соединенной в треугольник.

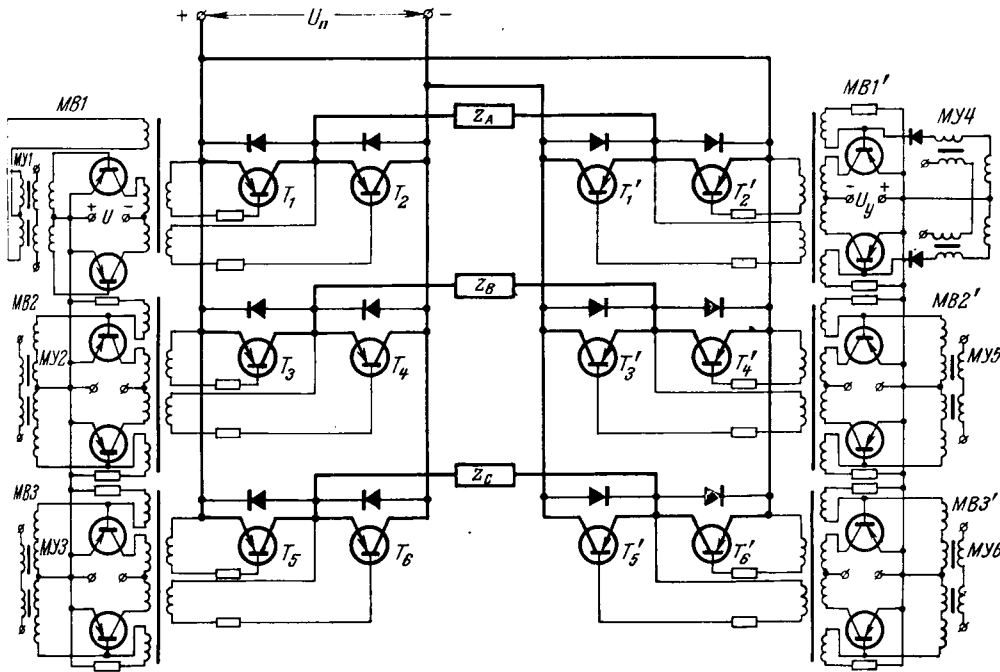


Рис. 1. Схема двойного трехфазного моста.

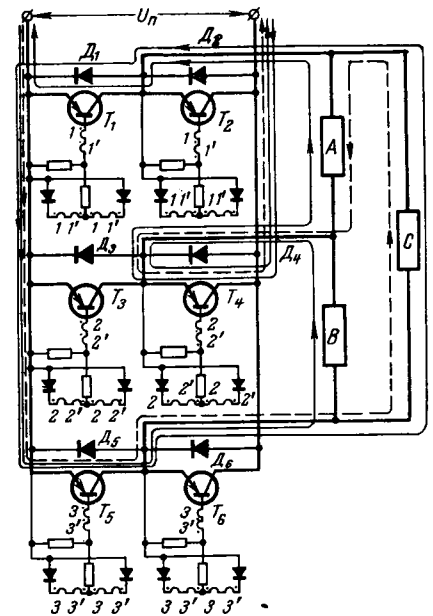


Рис. 3. Схема трехфазного моста с широтным регулированием выходного напряжения.

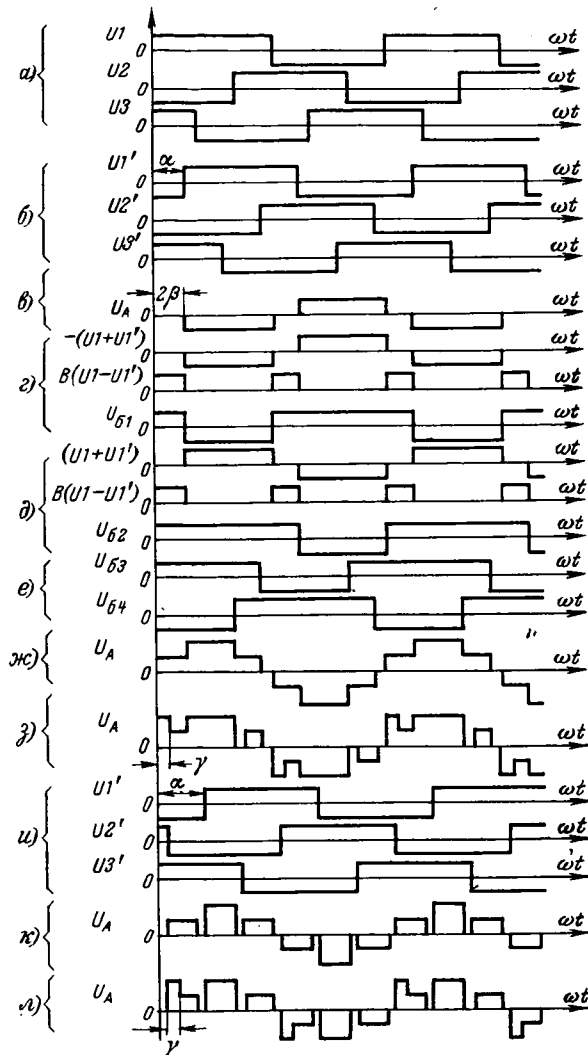


Рис. 2. Напряжения в схемах двойного и обычного мостов.

Пусть $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$ и при $\omega t = 0$ включены T_4 и T_5 , а T_2 только что отключился. Направление токов для этого момента показано на рис. 3. сплошными линиями. В первый момент после отключения T_2 индуктивный ток фазы А замыкается через диоды D_1 , D_4 и источник питания, а ток фазы С замыкается накоротко через диоды D_1 и T_5 . Следовательно, пока ток фазы А не изменит направление и не станет равным по величине току фазы С, к фазе А будет приложено полное напряжение, а к фазе С — нулевое.

Когда токи в фазах А и С станут равными ($\omega t = \gamma$), диод D_1 запирается, фазы А и С оказываются включенными последовательно, и поэтому напряжение на каждой из них равно половине напряжения источника питания. Пути токов для этого случая показаны на рис. 3 пунктирными линиями.

При $\omega t = 2\beta$ включается транзистор T_1 , напряжение на фазе А становится равным напряжению источника питания, фаза С замыкается накоротко, направления токов остаются без изменения.

В момент $\omega t = \frac{\pi}{3}$ отключается T_5 , и процесс повторяется, только теперь реверсируется ток в фазе С.

Таким образом, форма выходного напряжения при индуктивно-омической нагрузке (рис. 2, з и л) отличается от формы напряжения при активной нагрузке (рис. 2, ж и к).

Эффективное значение линейного напряжения при $0 \leq 2\beta = \frac{\pi}{3}$ равно:

$$U_L = U_n \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\beta}{\pi} + f T_n \ln \frac{4 - 2a - a^2 b}{2 - 2a + a^2}}, \quad (6)$$

где $a = e^{-\frac{1}{6fT_n}}$;
 $b = e^{\frac{2\beta}{T_n}}$.

Отсюда следует, что величина напряжения на выходе преобразователя зависит не только от угла β , но и от частоты, а также от постоянной времени нагрузки. Можно показать, что при

$$fT_n \geq \frac{1}{6 \ln 2} \quad (7)$$

напряжение на выходе преобразователя не регулируется, так как за счет индуктивного характера тока обмотка двигателя остается подключенной к источнику питания через соответствующий диод в течение всего угла регулирования $2\beta = \pi/3$.

На интервале $\pi/3 \leq 2\beta \leq 2\pi/3$ эффективное значение напряжения будет равно:

$$U_n = U_n \sqrt{1 - \frac{3\beta}{\pi} + fT_n \ln \frac{3 + (2a - 4a^2)b}{(2a - a^2)b}}. \quad (8)$$

Следует подчеркнуть, что максимум выходной мощности инвертора, выполненного по схеме двойного моста, вдвое больше максимума выходной мощности обычной мостовой схемы.

Перейдем к анализу эффективности амплитудного и широтного способов регулирования выходного напряжения инвертора, питающего асинхронный двигатель. Остановимся вначале на частотном управлении его скоростью при постоянном моменте и постоянной мощности на валу.

Регулирование напряжения при постоянном моменте на валу двигателя. Рассмотрим рабочие характеристики асинхронного двигателя¹ при регулировании частоты и напряжения согласно закону, обеспечивающему постоянство момента с компенсацией падения напряжения в сопротивлении статора, при питании двигателя:

- синусоидальным напряжением;
- прямоугольным напряжением при амплитудном управлении;
- прямоугольным напряжением с широтным регулированием.

При этом необходимо соблюдать условие равенства эффективных значений соответствующих напряжений.

В процессе регулирования частоты изменение напряжения осуществляется с компенсацией падения напряжения на полном сопротивлении статора:

$$U_v = (U_n - I_1 z_1)_{\omega_0} \omega + (I_1 z_1)_{\omega}. \quad (9)$$

График, построенный по формуле (9) для указанного двигателя, представлен на рис. 4 (график 1).

При широтном регулировании напряжения с изменением угла изменяются также коэффициенты амплитуд всех гармоник:

$$u = \frac{4U_n}{\pi} \left(\cos \beta \sin \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\beta \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\beta \sin 5\omega t + \dots \right). \quad (10)$$

¹ В качестве примера рассматривается двигатель мощностью 210 Вт с параметрами: $r_1 = 2,2 \text{ Ом}$; $r'_2 = 2,28 \text{ Ом}$; $x_1 = 2 \text{ Ом}$; $x'_2 = 3 \text{ Ом}$; $x_m = 46 \text{ Ом}$.

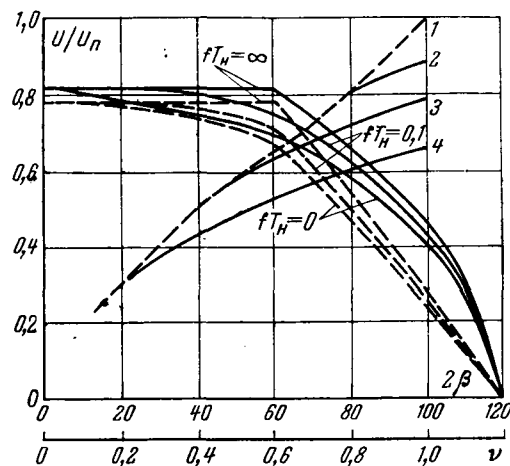


Рис. 4. Графики изменения напряжения в функции частоты.

1 — $M = \text{const}$; 2, 3 и 4 — $P = \text{const}$.
 Графики изменения эффективного напряжения (—) и напряжения 1-й гармоники (---) в схеме трехфазного моста с широтным регулированием при индуктивно-активной нагрузке.

На основании известных формул [Л. 4] нами были построены рабочие характеристики двигателя при частотах 50, 40, 22 и 10 гц. Сравнение этих характеристик показало, что при уменьшении частоты к. п. д. двигателя уменьшается: сравнительно медленно при синусоидальном напряжении, несколько быстрее при амплитудном регулировании и особенно сильно при широтном регулировании напряжения.

Однако эффективность рассматриваемых способов регулирования напряжения целесообразно характеризовать коэффициентом использования двигателя k_d , который равен отношению момента двигателя при несинусоидальном токе, эффективное значение которого равно номинальному току статора, к номинальному моменту двигателя. Действительно, в этом случае с учетом формулы (9) потери в статоре и роторе двигателя будут практически равны номинальным потерям двигателя на всем диапазоне регулирования частоты.

Справедливость сказанного была проверена соответствующими расчетами на основе рабочих характеристик двигателя указанной выше мощности. Следовательно, коэффициент использования двигателя действительно характеризует величину момента при несинусоидальном напряжении и номинальных потерях².

Очевидно, что при синусоидальном напряжении $k_d = 1$ на всем диапазоне регулирования частоты.

По рабочим характеристикам двигателя для частот 50, 40, 22 и 10 гц получены данные, по которым построены (рис. 5) в относительных единицах графики зависимости коэффициента использования двигателя в функции частоты при амплитудном (кривая 1) и широтном (кривая 2) регулировании напряжения.

Для амплитудного регулирования коэффициент

² При этом не учитывается необходимость снижения нагрузки из-за ухудшения условий охлаждения, что может быть сделано известными методами.

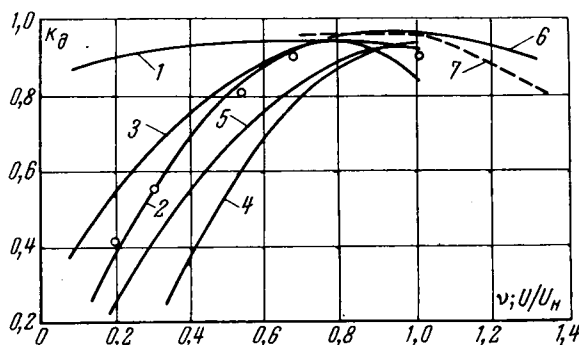


Рис. 5. Графики изменения коэффициента использования двигателя в функции от частоты в относительных единицах (1—5) и график изменения коэффициента использования двигателя при широтной стабилизации напряжения (6, 7).

использования двигателя на всем диапазоне изменения частоты сохраняется равным:

$$k_d = 0,9 \div 0,94.$$

При широтном регулировании напряжения k_d сначала повышается за счет улучшения формы напряжения, а затем быстро падает.

Регулирование напряжения при постоянстве мощности на валу двигателя. Оптимальные условия работы двигателя при регулировании скорости с постоянной мощностью на валу обеспечиваются при соблюдении известного [Л. 5] закона регулирования выходного напряжения инвертора:

$$\frac{U_v}{U_n} = \sqrt{\frac{f}{f_n}}. \quad (11)$$

Если при минимальной частоте учтено падение напряжения в сопротивлениях статора, то характер изменения напряжения на двигателе, параметры которого приведены выше, имеет вид кривых 2, 3, 4, изображенных на рис. 4. Эти графики построены по формуле (11) для нескольких значений диапазона регулирования и соответственно различных минимальных частот.

Из анализа кривых 1, 2, 3, 4 (рис. 4) следует, что если регулирование напряжения осуществляется при постоянной мощности двигателя, то эффективное значение напряжения при максимальной частоте будет меньше, чем при регулировании напряжения с неизменным вращающим моментом, причем это снижение напряжения зависит от диапазона регулирования. Двигатель в этом случае выбирают по моменту на минимальной скорости. С увеличением частоты момент на валу двигателя уменьшается обратно пропорционально скорости вращения. Величина коэффициента использования двигателя должна быть определена только на минимальной частоте, так как с увеличением скорости двигатель значительно недоиспользуется по моменту и потерям.

При амплитудном управлении снижение напряжения, соответствующее минимальной частоте, несколько не сказывается на величине k_d при минимальной скорости, поэтому остается справедливым график 1 (рис. 5).

При широтном регулировании амплитуда исходного полного прямоугольного напряжения при

максимальной частоте устанавливается в соответствии с кривыми 2, 3, 4 (рис. 4). В результате при минимальной частоте необходимая величина эффективного напряжения получается при меньших значениях угла β . Это ведет к повышению коэффициента использования двигателя.

Действительно, величина k_d (рис. 5, кривая 3), вычисленная на основании рабочих характеристик двигателя для регулирования напряжения инвертора широтным способом с учетом выполнения условий постоянства мощности на валу, имеет более высокие значения. Из сравнения кривых 2 ($M = \text{const}$) и 3 ($P = \text{const}$) следует, что улучшение коэффициента использования двигателя особенно заметно при большом диапазоне регулирования.

Во многих случаях для выбора мощности двигателя необходимо знать только коэффициент его использования по моменту. Расчеты рабочих характеристик показывают, что моменты от высших гармоник на 2—3 порядка меньше момента, создаваемого первой гармоникой напряжения. Это справедливо даже в случае широтного регулирования напряжения при низкой частоте, когда амплитуды 1-й, 3-й, 5-й и 7-й гармоник соизмеримы. Поэтому можно считать, что коэффициент использования двигателя по моменту приблизительно равен отношению эффективного значения напряжения 1-й гармоники к эффективному значению полного напряжения, т. е.

$$k_d \approx \frac{U_1}{U}, \quad (12)$$

где U_1 — эффективное значение напряжения первой гармоники, равное:

$$U_1 = \frac{4U_n}{\pi\sqrt{2}} \cos \beta. \quad (13)$$

Подставив в формулы (13) и (2) значения U_1 и U , получим:

$$k_d \approx \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{\cos \beta}{\sqrt{\pi - 2\beta}}. \quad (14)$$

По этой формуле рассчитаны значения k_d для случая регулирования при $M = \text{const}$, которые отмечены точками на рис. 5. Они практически совпадают с кривой, построенной на основе рабочих характеристик. Следовательно, при определении k_d можно исключить трудоемкий процесс определения рабочих характеристик двигателя.

Этот метод был использован при анализе обычной мостовой схемы с широтным регулированием (рис. 3). Здесь при $0 \leq 2\beta \leq \pi/3$ выходное напряжение преобразователя имеет форму, изображенную на рис. 2,3, формула разложения этого напряжения состоит из ряда косинусов углов с коэффициентами a_n и ряда синусов с коэффициентами b_n :

$$a_n = \frac{2U_n}{\pi n} \left[\sin n \frac{2\pi}{3} + \left(1 - \cos \frac{2\pi}{3} \right) \frac{1}{2} \sin n \gamma - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin n \frac{2\pi}{3} \cos \gamma + \left(\cos n \frac{2\pi}{3} - 1 \right) \frac{1}{2} \sin n 2\beta + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sin n \frac{2\pi}{3} \cos n 2\beta \right]; \quad (15)$$

$$b_n = \frac{2U_n}{\pi n} \left[\left(1 - \cos n \frac{2\pi}{3} \right) \left(1 - \frac{1}{2} \cos \gamma n + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2} \cos n 2\beta \right) + \frac{1}{2} \sin n \frac{2\pi}{3} \sin n 2\beta - \frac{1}{2} \sin n \frac{2\pi}{3} \sin n \gamma \right], \quad (16)$$

где n — номера гармоник (нечетных).

Эффективное значение напряжения 1-й гармоники равно:

$$U_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \frac{\sqrt{3} U_n}{2 \sqrt{2} \pi} \sqrt{8(3 - 2 \cos \gamma) - (\sqrt{3} + 4 \sin \gamma) 2 \sin 2\beta + (5 - 4 \cos \gamma) 2 \cos 2\beta}. \quad (17)$$

Если $\frac{\pi}{3} \leq 2\beta \leq \frac{2\pi}{3}$, то выходное напряжение имеет форму, изображенную на рис. 2, а, коэффициенты разложения в этом случае равны:

$$a_n = \frac{2U_n}{\pi n} \left[-\sin n \frac{\pi}{3} + \left(1 - \cos n \frac{2\pi}{3} \right) \frac{1}{2} \sin n \gamma - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin n \frac{2\pi}{3} \cos n \gamma + \left(1 - \frac{1}{2} \cos n \frac{2\pi}{3} - \frac{1}{2} \cos n \frac{4\pi}{3} \right) \times \right. \\ \left. \times \sin n 2\beta + \frac{1}{2} \cos 2\beta n \left(\sin n \frac{2\pi}{3} + \sin n \frac{4\pi}{3} \right) \right]; \quad (18)$$

$$b_n = \frac{2U_n}{\pi n} \left[1 + \cos n \frac{\pi}{3} - \frac{1}{2} \left(1 - \cos n \frac{2\pi}{3} \right) \cos n \gamma - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin n \frac{2\pi}{3} n \sin n \gamma + \left(1 - \frac{1}{2} \cos n \frac{2\pi}{3} - \frac{1}{2} \cos n \frac{4\pi}{3} \right) \right]. \quad (19)$$

Эффективное значение напряжения 1-й гармоники равно:

$$U_1 = \frac{\sqrt{3} U_n}{2 \sqrt{2} \pi} \times \\ \times \sqrt{32 - 8 \sqrt{3} \sin \gamma - 2 \cos \gamma - (2 - \sqrt{3} \sin \gamma + \sqrt{3} \cos \gamma) 4 \sqrt{3} \sin 2\beta + (2 \sqrt{3} - 2 \sqrt{3} \cos \gamma - \sin \gamma) 4 \sqrt{3} \cos 2\beta}. \quad (20)$$

Из формул (6), (8), (20) и (17) следует, что выходное напряжение преобразователя и его первая гармоника зависят не только от угла β , но и от постоянной времени нагрузки T_n и частоты f . Семейства кривых $\frac{U_{вых}}{U_n} = f(2\beta; fT_n)$ и $\frac{U_1}{U_n} = f(2\beta; fT_n)$, построенные на рис. 4, показывают, что с увеличением fT_n одновременно и практически одинаково возрастают полное напряжение на выходе инвертора и его 1-я гармоника. Отношение этих величин фактически не зависит от частоты и постоянной времени нагрузки. Это позволяет воспользоваться для определения k_d более простым разложением выходного напряжения инвертора в ряд при активной нагрузке:

для $0 \leq 2\beta \leq \frac{\pi}{3}$

$$U = \frac{2 \sqrt{3} U_n}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\cos \beta n}{n} \sin n \omega t; \quad (21)$$

для $\frac{\pi}{3} \leq 2\beta \leq \frac{2\pi}{3}$

$$U = \frac{3U_n}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\sqrt{3} \cos \beta n - \sin \beta n}{n} \sin n \omega t. \quad (22)$$

Определив из выражений (21) и (22) эффективное значение напряжения первой гармоники и считая, что выходное напряжение преобразователя на соответствующих интервалах изменяется согласно уравнениям (4) и (5), определим формулы для вычисления коэффициента использования двигателя на интервалах $0 \leq 2\beta \leq \pi/3$ и $\pi/3 \leq 2\beta \leq 2\pi/3$ соответственно:

$$k_d \approx \frac{3 \cos \beta}{\pi \sqrt{1 - \frac{3\beta}{2\pi}}}; \quad (23)$$

$$k_d \approx \frac{3 (\sqrt{3} \cos \beta - \sin \beta)}{\pi \sqrt{2} \sqrt{1 - \frac{3\beta}{\pi}}}. \quad (24)$$

На основе (23) и (24) можно определить график $k_d = f(\nu)$ для схемы обычного трехфазного моста при регулировании с $M = \text{const}$ (рис. 5, кривая 4) и $P = \text{const}$ (кривая 5), которые идут ниже

соответствующих кривых для схемы двойного трехфазного моста.

По графикам, изображенным на рис. 5, можно сделать несколько выводов.

При широком диапазоне регулирования скорости асинхронного двигателя частотным способом необходимо использовать инверторы с амплитудным управлением, которые обеспечивают высокий коэффициент использования машины.

При небольшом (порядка 1:2) диапазоне регулирования скорости достаточно эффективен широтный способ управления, который позволяет получить приемлемый коэффициент использования двигателя и значительно уменьшить установленную мощность транзисторов.

Схема двойного моста при широтном регулировании обеспечивает более высокий коэффициент использования двигателя по сравнению с обычной мостовой схемой. Увеличение вдвое числа выходных транзисторов в первом случае повышает выходную мощность инвертора также в 2 раза.

На основании анализа, изложенного выше, становится очевидным, что вторая задача — стабилизация выходного напряжения инвертора при постоянной частоте — эффективно решается применением схем с широтным управлением. Если известен диапазон изменения напряжения источника питания $\pm \Delta U$, то пределы регулирования угла 2β равны:

$$\left. \begin{aligned} 2\beta_{\min} &= \pi - (\pi - 2\beta_n) \frac{U_n^2}{(U_n - \Delta U)^2}; \\ 2\beta_{\max} &= \pi - (\pi - 2\beta_n) \frac{U_n^2}{(U_n + \Delta U)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где $2\beta_n$ — угол, соответствующий номинальному напряжению источника питания.

На рис. 5 (графики 6, 7) сплошной линией показана вычисленная по формулам (14) и (25) зависимость k_d двигателя от диапазона изменения напряжения источника питания для схемы двойного моста (рис. 1) при $2\beta_n = \frac{\pi}{3}$. Очевидно, здесь $2\beta_{\min} \leq 0$.

В схеме обычного трехфазного моста $2\beta_{\min} = \frac{\pi}{3}$. На рис. 5 пунктиром показан график $k_d = f\left(\frac{U}{U_n}\right)$ для схемы, изображенной на рис. 3.

Принятые обозначения:

- α — угол сдвига между выходными напряжениями двух задающих генераторов;
- β — половина угла нулевой ступени выходного напряжения;
- γ — угол, в течение которого напряжение на нагрузке реверсируется за счет э. д. с. самоиндукции;
- ν — относительная частота;
- a — экспонента с аргументом $\frac{1}{6fT_n}$;
- a_n, b_n — коэффициенты разложения ряда Фурье;
- f — частота переменного тока;
- k_d — коэффициент использования двигателя;
- r_1, r_2 — активное сопротивление статора и приведенное сопротивление ротора;
- T_n — постоянная времени нагрузки;
- U_n — линейное напряжение нагрузки;
- U_n — напряжение источника питания;
- U_v — напряжение на двигателе при частоте ν ;
- z_1 — полное сопротивление статора при номинальной частоте.

Литература

1. Коссов О. А. и Хасаев О. И., Усилители мощности с широтно-импульсной модуляцией на переключающих транзисторах, «Электричество», 1961, № 12.
2. Коссов О. А. и Хасаев О. И., Электропривод с частотным регулированием скорости двигателя, Авторское свидетельство № 134745 от 2 марта 1960 г.
3. Kernick A., Roof J., Heinrich T. M., Static Inverter with Neutralisation of Harmonics, «Applications and Industry», 1962, № 60, p. 59.
4. Хасаев О. И., Работа асинхронного двигателя от преобразователя частоты на полупроводниковых триодах, «Электричество», 1961, № 9.
5. Костенко М. П., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1944, стр. 701.

[8.9.1964]



УДК 621.319.5 : 621.3.014.3

Методы компенсации потерь в нагрузке при формировании плоских импульсов тока на экспериментальной установке

Кандидат техн. наук В. В. КАПЛАН, кандидат техн. наук В. М. НАШАТЫРЬ и инж. В. А. ПОПОВА

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

При постановке ряда физических экспериментов, связанных с исследованием физики плазмы, возникает необходимость получить в индуктивной нагрузке импульс тока, имеющий плоскую часть заданной длины. Основная энергия передается в нагрузку от накопителя энергии, причем после создания фронта импульса для поддержания постоянства тока необходимо компенсировать потери энергии в активном сопротивлении нагрузки. В современных установках энергия импульса может достигать 10^7 — 10^8 дж, и при этом активные потери могут составлять 10^6 дж и более.

Методы компенсации активных потерь. Для передачи в индуктивную нагрузку значительной энергии в течение ограниченного промежутка времени применяются различного рода накопители энергии: емкостные (накопление энергии в электрическом поле конденсаторов), индуктивные (накопление энергии в магнитном поле индуктивных катушек), электромашинные (использование кинетической энергии роторов электрических машин), аккумуляторные (использование химической энергии).

Если при достижении током в нагрузке максимального значения ее закоротить, то активное со-

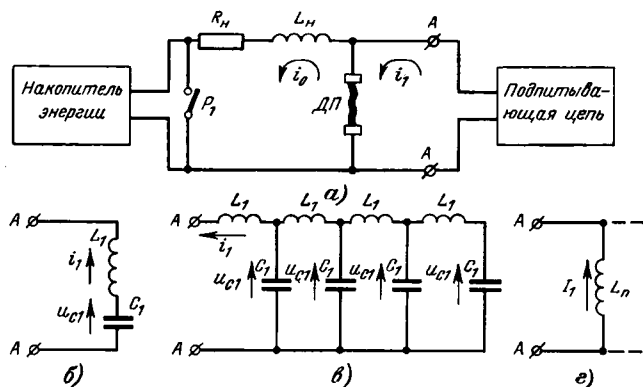


Рис. 1. Схемы компенсации активных потерь в индуктивной нагрузке с использованием дугового промежутка.

противление нагрузки может вызвать затухание тока, недопустимое по условиям физического эксперимента. В тех случаях, когда ток в нагрузке должен поддерживаться постоянным длительное время, для компенсации активных потерь необходимо применять машинно-выпрямительные или аккумуляторные установки. Если же время подпитки составляет десятки миллисекунд, то для этой цели могут быть использованы схемы (рис. 1 и 2) с источниками, имеющими ограниченные запасы энергии.

Как известно, при определенных условиях напряжение на дуге может поддерживаться неизменным во времени. Это обстоятельство позволяет использовать схему с дуговым промежутком ДП (рис. 1,а) для компенсации активных потерь в индуктивной нагрузке¹. Первоначально контакты ДП замкнуты. При достижении током i_0 максимального значения ($i_0 = I_{\text{макс}}$) накопитель энергии шунтируется разъединителем P_1 ; одновременно контакты ДП расходятся, и в нем образуется дуга. Если напряжение на дуге $U_{\text{дп}}$ равно по величине и противоположно по направлению падению напряжения на активном сопротивлении нагрузки R_n , т. е. $U_{\text{дп}} = U_0 = I_{\text{макс}} R_n$, то активные потери в нагрузке полностью компенсируются, и ток поддерживается постоянным в течение заданного времени T . Для этого ток i_1 в подпитывающей цепи в течение времени T должен превышать ток в нагрузке $i_0 = I_{\text{макс}}$.

Подпитывающая цепь, шунтирующая дуговой промежуток, может быть выполнена различным образом. В схеме на рис. 1,б в качестве подпитывающей цепи использован колебательный контур $L_1 C_1$. Графики на рис. 3 характеризуют процессы, протекающие в схеме. В момент t_1 , когда $i_0 = I_{\text{макс}}$, мгновенное значение подпитывающего тока также равно $I_{\text{макс}}$; далее в течение времени T ток $i_1(t)$ больше $I_{\text{макс}}$. При $t > t_2$ ток $i_1(t)$ будет меньше $I_{\text{макс}}$ и при $t = t_2$ подпитка заканчивается. Для того чтобы исключить обратную передачу энергии из нагрузки в подпитывающую цепь, контакты ДП замыкаются в момент t_2 . Параметры колебательного контура могут быть рассчитаны для заданных

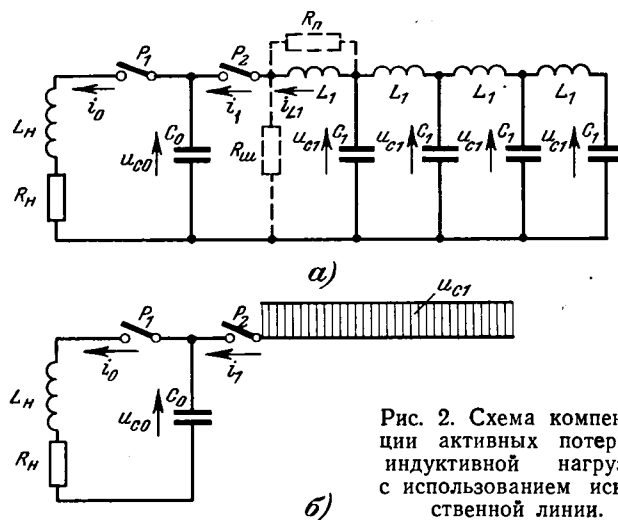


Рис. 2. Схема компенсации активных потерь в индуктивной нагрузке с использованием искусственной линии.

значений T , $I_{\text{макс}}$ и $U_{\text{дп}}$ по следующим уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} i_1(t_1) &= I_{\text{макс}} = U_{C1} \omega_1 C_1 \sin \omega_1 t_1; \\ i_1(t_2) &= I_{\text{макс}} = U_{C1} \omega_1 C_1 \sin \omega_1 t_2 - \\ &\quad - U_{\text{дп}} \omega_1 C_1 \sin \omega_1 (t_2 - t_1), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$.

При необходимости параметры контура могут быть также выбраны для обеспечения оптимального режима работы, при котором получается наибольший коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{U_{\text{дп}} I_{\text{макс}} T}{C_1 U_{C1}^2}.$$

Подпитывающая цепь может быть выполнена в виде искусственной линии (цепной схемы) с несколькими звеньями (рис. 1,в). При этом компенсация активных потерь осуществляется не при синусоидальном токе, как в случае подпитки от колебательного контура, а при разрядном токе, форма которого приближается к прямоугольной. Поэтому при той же энергии, запасенной в подпитывающей цепи, время подпитки увеличивается, т. е. возрастает к. п. д.

Для шунтирования дугового промежутка может быть также использована индуктивность L_{π} (рис. 1,г), в которой предварительно запасается энергия, достаточная для того, чтобы в течение времени T ток i_1 был больше $I_{\text{макс}}$.

Схемы с дуговым промежутком могут быть применены при всех видах исполнения накопителя энергии. В частном случае при применении емкостного накопителя энергии для компенсации активных потерь может также использоваться искусственная линия (рис. 2,а)². Рассмотрим процессы в этой схеме в предположении, что для подпитки используется линия с распределенными параметрами (рис. 2,б), заряженная до напряжения U_{C1} . Линия подключается к нагрузке в момент, когда

¹ Каплан В. В. и Нашатырь В. М., Электрическое разрядное устройство, Авторское свидетельство № 156244, Бюллетень изобретений, 1963, № 15.

² Схема рис. 2 разработана в лаборатории ЭСитВН им Горьва в 1959 г.

ток i_0 в колебательном контуре $L_n C_0$ достигает максимума; напряжение на емкости C_0 при этом равно $u_{C0} = U_0 = I_{0\text{макс}} R_n$. Заменяя линию ее волновым сопротивлением z и источником постоянного напряжения U_{C1} и учитывая, что напряжение на емкости C_0 не может мгновенно измениться, найдем, что подпитывающий ток I_1 равен:

$$I_1 = \frac{U_{C1} - U_0}{z}. \quad (2)$$

Для того чтобы в схеме сразу имел место установившийся процесс, ток I_1 должен быть равен току $i_0 = I_{0\text{макс}}$, протекающему в нагрузке в момент подключения линии. В дальнейшем ток поддерживается постоянным в течение времени, равном двойному времени пробега волны вдоль линии. Таким образом, волновое сопротивление линии z , используемой для поддержания постоянства тока в нагрузке, должно быть равно (при заданной величине напряжения U_{C1}):

$$z = \frac{U_{C1} - U_0}{I_{0\text{макс}}} = \frac{U_{C1} - R_n I_{0\text{макс}}}{I_{0\text{макс}}}. \quad (3)$$

В случае выбора определенного значения z ее зарядное напряжение должно быть равно:

$$U_{C1} = I_{0\text{макс}} (z + R_n). \quad (4)$$

Обычно при постановке физических экспериментов выдвигаются достаточно жесткие требования к форме импульса тока в индуктивной нагрузке, а именно требуется, чтобы наложенные колебания на плоской части импульса не превышали некоторого значения $\epsilon\%$, и при этом была бы по возможности уменьшена величина di_0/dt , т. е. колебания напряжения u_{C0} не должны превышать $\delta\%$ (при достаточно малых значениях ϵ и δ).

При применении схемы с дуговым промежутком точность поддержания постоянства тока в нагрузке зависит только от формы напряжения на дуге. Поэтому для обеспечения малых значений ϵ и δ необходимы специальные устройства, которые с достаточной точностью обеспечивали бы постоянство напряжения на дуге в течение всего времени прохождения тока. Например, дуговой промежуток может быть выполнен аналогично дугогасительным устройствам современных высоковольтных выключателей с продольным воздушным дутьем.

При использовании для подпитки цепной схемы с небольшим числом звеньев, параметры которой рассчитаны по приведенным выше формулам, колебания тока i_0 и напряжения u_{C0} могут быть весьма значительны. Уменьшение этих колебаний до требуемой величины может быть достигнуто лишь при специальном подборе параметров цепочки и включении в схему добавочных демпфирующих сопротивлений. При этом точный расчет параметров цепочки представляет большие математические трудности и не всегда может быть выполнен. Поэтому целесообразно использовать для расчета цепной схемы математическую машину непрерывного действия.

Исследование на математической машине процессов в схеме подпитки. Исследование режимов

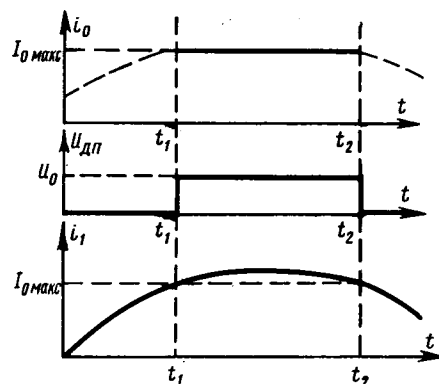


Рис. 3. Токи и напряжение на дуговом промежутке в схеме на рис. 1.

работы схемы на рис. 2 позволило выявить влияние отдельных параметров на форму импульса тока и рассмотреть некоторые методы корректирования формы импульса.

Теоретически оптимальной является цепочка, волновое сопротивление которой равно сопротивлению нагрузки ($z = R_n$). Для линии с распределенными параметрами (рис. 2, б) в этом случае вся энергия, предварительно сосредоточенная в линии, переходит в нагрузку за время, равное двойному времени пробега волны вдоль линии. С известной степенью приближения это происходит и в цепной схеме при $z = R_n$. Зарядное напряжение конденсаторов цепочки при этом равно $U_{C1} = 2U_0 = 2I_{0\text{макс}} R_n$. Если номинальное напряжение конденсаторов U_n отличается от U_{C1} , выбор параметров цепочки, исходя из условия $z = R_n$, может привести к неполному использованию конденсаторов подпитывающей схемы (по наибольшей величине энергии, которая может быть в них накоплена). Так, например, если $U_n = 3U_0$, то энергия, которая могла бы быть сосредоточена в цепочке, будет в 2,25 раза больше требуемой для компенсации активных потерь. Поэтому при выборе параметров схемы более целесообразно исходить из номинального напряжения применяемых конденсаторов; волновое сопротивление цепочки z определяется при этом по формуле (3). Хотя при $z \neq R_n$ после времени удвоенного пробега волны расходуется не вся энергия, запасенная в цепочке, однако по сравнению со случаем $z = R_n$ конденсаторы используются лучше. Так, например, запас энергии в конденсаторах при $U_n = 3U_0$ должен составлять 1,125 количества энергии, необходимой для компенсации активных потерь.

Исследования режимов работы схемы на рис. 2, а, проведенные на математической машине, показали, что амплитуда колебаний подпитывающего тока i_1 уменьшается с увеличением волнового сопротивления цепочки. При этом если при малом z колебания наблюдаются по всей длине импульса, то с увеличением z они быстро затухают. Частота наложенных колебаний во всех случаях примерно одинакова. Как видно из рис. 4, а, колебания тока нагрузки i_0 сравнительно невелики (около 2%) даже в случае, когда колебания подпитывающего тока достигают 100%. Однако колебания напряже-

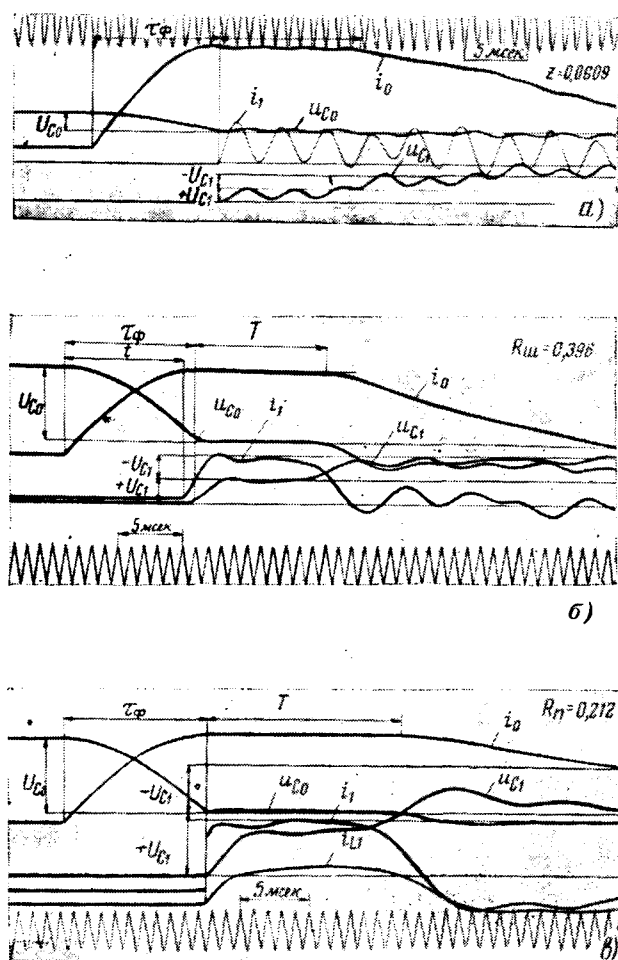


Рис. 4. Результаты расчетов на машине непрерывного действия процессов в схеме на рис. 2,а при отсутствии дополнительных сопротивлений (а), при включении $R_{ш}$ (б) и при включении $R_{ш}$ и R_n в схему с дополнительным запасом энергии в подпитывающей цепочке (в).

ния на емкости C_0 при этом весьма значительны (до 11%).

Из осциллограммы на рис. 4,а видно, что в процессе работы схемы на конденсаторах появляются перенапряжения, недопустимые для их изоляции. При этом ток i_1 не имеет четко выраженного перехода через нуль, поэтому отключить цепную схему до момента повышения напряжения на конденсаторах выше номинального оказалось бы весьма сложным. Для защиты конденсаторов от перенапряжений параллельно основной батарее следует подключать активное сопротивление $R_{ш}$, показанное пунктиром на рис. 2,а. Соответствующим подбором величины $R_{ш}$ можно снизить напряжение на конденсаторах. В этом случае также полностью устраняются колебания на плоской части импульса тока нагрузки.

В схеме с сопротивлением $R_{ш}$ кривая тока i_0 (рис. 4,б) имеет некоторый спад, который можно компенсировать изменением величины индуктивностей по длине цепочки (заметим, что при этом несколько уменьшается время подпитки). Однако практическое выполнение цепочки с разными величинами индуктивностей отдельных звеньев может оказаться затруднительным.

Несколько улучшить форму кривой импульса тока удается путем сдвига момента t подключения цепочки к нагрузке. Наилучшая форма импульса получается при $t \approx 0,9 \tau_{\phi}$ независимо от величины волнового сопротивления цепочки. При включении в схему сопротивления $R_{ш}$ зависимость формы импульса от момента t уменьшается.

Расчеты на математической машине показали, что наилучший по форме и легко регулируемый импульс получается в том случае, если энергия, запасенная в подпитывающей цепи, больше, чем требуемая для компенсации активных потерь. Плоская часть импульса, получаемого в этом случае, имеет некоторый подъем; кроме того, колебания, наложенные на плоскую часть, оказываются несколько большими, чем в предыдущем варианте. Однако эти колебания удается задемпфировать включением в схему активного сопротивления R_n (рис. 2,а).

Для защиты конденсаторов от перенапряжений и для демпфирования наложенных колебаний также должно быть включено сопротивление $R_{ш}$. Однако в схеме с дополнительным запасом энергии величина сопротивления $R_{ш}$ определяется требуемым наклоном плоской части импульса и оказывается меньшей, чем при выборе параметров схемы из условия $U_{C1\max} = U_n$, где U_n — номинальное напряжение конденсаторов, $U_{C1\max}$ — наибольшее напряжение на конденсаторах в процессе их перезарядки.

Соответствующим подбором сопротивлений $R_{ш}$ и R_n удается получить импульс тока (рис. 4,в), практически без наложенных колебаний на плоской его части. При этом колебания напряжения u_{C0} составляют менее 1%. Длина плоской части импульса в такой схеме несколько больше расчетной.

Отметим, что в схеме с дополнительным запасом энергии момент подключения цепочки к нагрузке практически не влияет на форму импульса. Это обстоятельство весьма существенно при практическом осуществлении схемы, так как уменьшаются требования к точности работы включающих аппаратов и синхронизирующих устройств.

Исследования на экспериментальной установке. Исследования схем на рис. 1 и 2 показали, что они позволяют получить импульс тока требуемой формы.

На рис. 5 приведена схема экспериментальной установки с дуговым промежутком, шунтированной цепной схемой. Максимальная энергия, которая могла быть сосредоточена в емкости C_0 , составляла около $5,5 \cdot 10^4$ дж, а в подпитывающей цепи (емкость C_1) — соответственно $2,5 \cdot 10^4$ дж. Переключения в схеме осуществляются с помощью

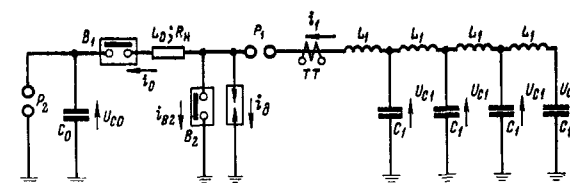
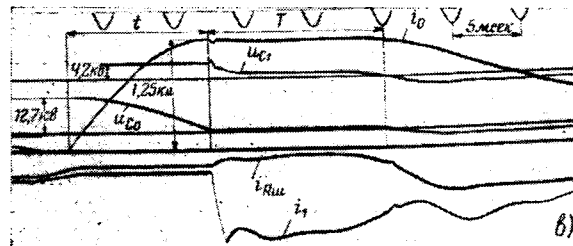
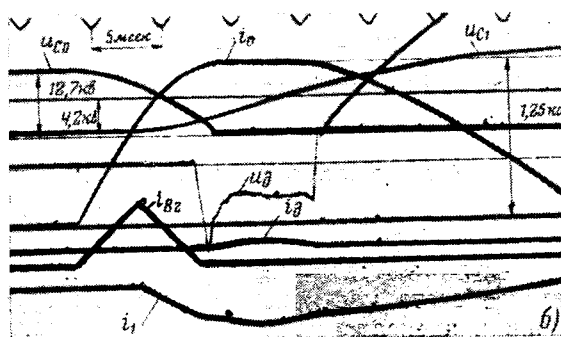
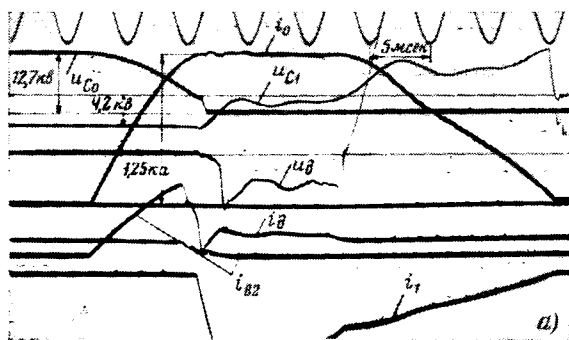


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.



шаров, снабженных поджигающими устройствами, и выключателя B_1 . В качестве дугового промежутка используется комбинация из вспомогательного выключателя B_2 и трубчатого разрядника $ТР$ с плавкой вставкой, натянутой между его внутренними электродами. Контакты B_2 размыкаются незадолго до момента t_1 , в котором ток i_0 достигает максимального значения. При $i_0 = I_{0\text{макс}}$ ток из B_2 перебрасывается в трубчатый разрядник, в котором мгновенно перегорает тонкая плавкая вставка и образуется дуга.

Наклон плоской части импульса в такой схеме может регулироваться изменением расстояния между электродами разрядника $ТР$, так как напряжение на дуге U_d растет с увеличением ее длины. Для шунтирования дугового промежутка использовались колебательный контур и цепная схема. Соответствующие осциллограммы, характеризующие процессы в этих схемах, приведены на рис. 6, а, б*.

Как видно из осциллограмм, длина плоской части импульса в случае шунтирования дугового промежутка цепочкой оказывается больше, чем для простого колебательного контура (при одинаковой запасенной энергии).

* Небольшое искажение кривой тока i_0 , которое наблюдается в момент срабатывания коммутирующих устройств (в момент амплитуды тока), обусловлено влиянием на измерительную цепь переходных процессов в других элементах схемы (то же относится и к осциллограмме на рис. 6, в).

Рис. 6. Осциллограммы, снятые при исследовании схемы с дуговым промежутком, шунтированным цепочкой (а) или колебательным контуром (б), и в схеме с искусственной линией (в).

Проведенные опыты показали, что даже при использовании простейшего дугового промежутка, не обеспечивающего достаточной повторяемости формы напряжения на дуге от опыта к опыту, удается удовлетворительно компенсировать активные потери в индуктивной нагрузке.

Экспериментальное опробование схемы, показанной на рис. 2, показало, что при значениях параметров, соответствующих расчету на математической машине, получается импульс тока требуемой формы. Однако величина сопротивления $R_{ш}$ должна быть при этом несколько увеличена, так как при расчете не учитывались активные сопротивления цепочки. Форма импульса тока, полученного на экспериментальной установке, приведена на рис. 6, в.

[12.3.1964]



К расчету режима минимальных потерь в цепи с ферромагнетиком, перемагничиваемым от заряженного конденсатора

Доктор техн. наук В. Е. БОГОЛЮБОВ, инж. Ф. П. ЖАРКОВ и инж. Г. Г. ГУСЕВ

Московский энергетический институт

В качестве элемента вычислительных машин дискретного счета часто используется контур, содержащий конденсатор, катушку с ферромагнетиком на тороиде, имеющим прямоугольную петлю гистерезиса, и активное сопротивление (рис. 1). В данной статье сделана попытка определить условия, при которых перемагничивание ферромагнетика, обусловленное разрядом конденсатора в таком контуре, сопровождается минимальными потерями.

Скорость работы вычислительных машин столь велика, что представляет интерес рассмотрение переходного процесса в первые мгновения после замыкания рубильника. В это время процесс намагничивания сердечника не описывается статической петлей гистерезиса $B(H)$, а может быть приближенно описан зависимостью $Q(B)$ [Л. 1], где B — магнитная индукция в сердечнике, а $Q = \int (H - H_{ст}) dt$ представляет собой так называемый импульс поля, причем напряженность «поля старта» ($H_{ст}$) равна половине ширины идеализированной прямоугольной петли гистерезиса. В ряде работ успешно применяется следующая аппроксимация зависимости $Q(B)$ [Л. 2]:

$$Q(B) = \frac{1}{\delta} \operatorname{Arth} \frac{B}{B_s} - \frac{1}{\delta} \operatorname{Arth} \frac{B_r}{B_s},$$

где δ — постоянный коэффициент;

B_r и B_s — соответственно остаточная индукция и индукция насыщения.

Введение этой аппроксимации эквивалентно замене обмотки тороида активным сопротивлением, зависящим от индукции по уравнению

$$r(B) = r_m \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2} \right),$$

где r_m — максимальная величина динамического сопротивления феррита при перемагничивании по полному циклу.

Аналитически рассчитать переходный процесс в цепи на рис. 1 с учетом этой аппроксимации затруднительно. Тем более затруднительно исследовать условия минимальных потерь при перемагничивании. Поэтому не будем учитывать изменение эквивалентного активного сопротивления, определяющего потери в сердечнике при перемагничивании, заменив его усредненным постоянным сопротивлением [Л. 3]:

$$r_2 = \frac{2B_r S \omega^2}{Q_w l}, \quad (1)$$

где S — сечение сердечника;

l — длина его средней линии;

ω — число витков обмотки;

Q_w — величина импульса поля, соответствующего приращению индукции от $-B_r$ до $+B_r$.

Выражение (1) находится из рассмотрения уравнения для напряжения на обмотке тороида:

$$u = \omega S \frac{dB}{dt} = \omega S \frac{dB}{dQ} \frac{dQ}{dt} = \frac{\omega^2 S}{l} \frac{dB}{dt} \frac{dq}{dt},$$

где q — заряд;

$Q = q \frac{\omega}{l}$ — импульс поля;

$\frac{dq}{dt} = i$ — ток.

Заменяя производную $\frac{dB}{dt}$ конечными прираще-

ниями, приходим к выражению (1). Заметим, что величина Q_w связана с напряженностью H_m простым соотношением $Q_w = H_m t_1$, где t_1 — время перемагничивания.

Индуктивность рассеяния полагаем равной нулю.

Задача сводится к тому, чтобы по известным данным: начальному напряжению на конденсаторе U_0 , емкости C , сопротивлению r_1 и требуемой длительности процесса перемагничивания t_1 найти эквивалентное сопротивление r_2 , определяющее потери в сердечнике при перемагничивании, или число витков обмотки. При заданном времени перемагничивания и известной динамической петле гистерезиса, площадь которой равна энергии, затрачиваемой на перемагничивание, фактически задается средняя мощность на переключение.

Процесс перемагничивания тороида в цепи на рис. 1 можно приближенно представить эквивалентной схемой по рис. 2. Замыкание рубильника 1 соответствует началу процесса перемагничивания и характеризуется функцией $B(Q)$. Производная $\frac{dB}{dQ}$ в этот момент времени велика (велико, следовательно, эквивалентное активное сопротивление тороида). При окончании перемагничивания $\frac{dB}{dQ}$ стремится к нулю, что соответствует замыканию рубильника 2. Активное сопротивление обмоток реальных цепей логики, как правило, много меньше r_2 и r_1 (под r_1 понимается эквивалентное сопротивление диода в прямом направлении).

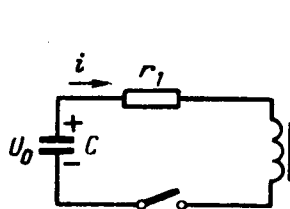


Рис. 1.

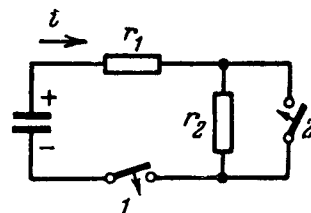


Рис. 2.

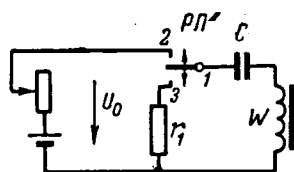


Рис. 3.

Потери энергии происходят в сопротивлении r_1 при перемагничивании ($0 < t < t_1$) и после перемагничивания ($t_1 < t < \infty$). При $t = t_1$ происходит скачкообразное увеличение тока, величина которого при заданных U_0 и C зависит от соотношения между r_1 и r_2 . Если $r_2 \gg r_1$, то потери энергии в процессе перемагничивания будут сравнительно малы, но после перемагничивания будет большой бросок тока и соответственно резко возрастут потери. Если $r_2 \ll r_1$, то будут относительно велики потери во время перемагничивания.

Определим условия, при которых суммарные потери, сопутствующие перемагничиванию, будут минимальны. Полные потери энергии при разрядке конденсатора равны:

$$A_n = \int_0^{t_1} i'^2 r_1 dt + \int_{t_1}^{\infty} i''^2 r_1 dt,$$

где

$$i' = \frac{U_0}{r_1 + r_2} e^{-\frac{t}{(r_1 + r_2)C}}, \quad i'' = \frac{U_0 e^{-\frac{t_1}{(r_1 + r_2)C}}}{r_1} e^{-\frac{t-t_1}{r_1 C}}.$$

Из этих выражений видно, что ток i'' возникает в момент времени t_1 , т. е. в момент прекращения действия первого процесса.

Выполняя простые преобразования, получаем:

$$A_n = \frac{CU_0^2}{2} \frac{r_1}{r_1 + r_2} \left(1 + \frac{r_2}{r_1} e^{-\frac{2t_1}{(r_1 + r_2)C}} \right). \quad (2)$$

Для нахождения сопротивления r_2 , при котором потери минимальны, рассмотрим уравнение

$$\frac{\partial A_n}{\partial r_2} = 0, \quad (3)$$

из которого с учетом уравнения (2) получаем:

$$(Cr_1^2 + Cr_1 r_2 + 2t_1 r_2) e^{-\frac{2t_1}{(r_1 + r_2)C}} = Cr_1^2 + Cr_1 r_2. \quad (4)$$

Анализ второй производной уравнения (4) показывает, что оно соответствует минимуму потерь энергии. Отсюда, в частности, следует, что принимаемое обычно условие наиболее экономичного перемагничивания $r_1 = r_2$ не соответствует действительности.

Оптимальное число витков катушки, соответствующее найденному из уравнения (4) оптимально-

му значению $r_{2\text{опт}}$, можно определить по уравнению (1), разрешенному относительно числа витков. При этом величина H_m , от которой зависит Q_w , находится по длительности перемагничивания при помощи кривых, приведенных в справочнике [Л. 4].

Указанный элементарный расчет носит лишь грубо ориентировочный характер, однако получаемые результаты не расходятся существенно с опытом.

Экспериментальная проверка производилась по схеме, изображенной на рис. 3. Коммутация осуществлялась поляризованным реле РП, включенным

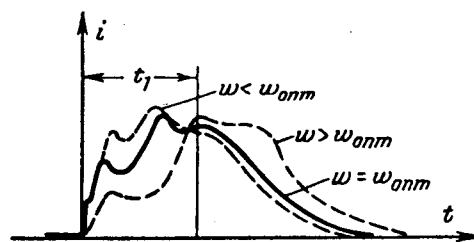


Рис. 4.

в сеть промышленной частоты. В положении контактов 1—2 происходит перемагничивание тороида и зарядка емкости, а в положении 1—3 — ее разряд и возвращение тороида в исходное магнитное состояние. Приводимые на рис. 4 осциллограммы тока сняты для следующих параметров схемы: $r_1 = 100 \text{ ом}$, $C = 2080 \text{ нФ}$, сердечник К-134 при различных значениях чисел витков — меньших, равных и больших оптимального их числа $\omega_{\text{опт}}$; напряжение на сопротивлении r_1 пропорционально току в цепи. На всех осциллограммах отмечено время перемагничивания t_1 . Из рассмотрения осциллограмм легко заключить, что при $\omega < \omega_{\text{опт}}$ относительно велики потери в процессе перемагничивания, при $\omega > \omega_{\text{опт}}$ существенны потери после перемагничивания, при $\omega = \omega_{\text{опт}}$ потери минимальны.

Литература

1. Поливанов К. М., Ферромагнетики, Госэнергоиздат, 1957.
2. Ферриты, Доклады III Всесоюзного совещания по физике, физико-химическим свойствам ферритов и их основным применениям, Изд. АН БССР, 1960.
3. Sands E., The magnetic shift register operation. Proc. I.R.E., 1953, № 8.
4. Пирогов А. И. и Шамаев Ю. М., Характеристики ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса (справочник), МЭИ, 1962.

[25.1.1965]



Сокращенная запись уравнения наивыгоднейшего распределения нагрузки между электрическими станциями, связанными однородной электрической сетью

Кандидат техн. наук, доц. В. Г. ЖУРАВЛЕВ

Кишинев

Условия наивыгоднейшего распределения нагрузки между параллельно работающими электрическими станциями, связанными электрической сетью произвольной конфигурации, могут быть записаны в следующем виде [Л. 1—3]:

$$\frac{\lambda_i b_i \pi_i}{1 - \frac{\partial P_{\pi}}{\partial P_i} - \frac{\frac{\partial P_{\pi}}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial P_i}}{1 - \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial Q_i}}} = \text{idem}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент энергетической эффективности (неопределенный множитель Лагранжа);

b — относительный прирост расхода первичного ресурса (топлива или воды) на электростанциях;

π — цена топлива;

P_{π} — потери активной мощности в сети;

Q_{π} — потери реактивной мощности в сети;

P — активная нагрузка электростанции;

Q — реактивная нагрузка электростанции.

Индекс i означает, что данное условие применяется для каждой i -ой электростанции, входящей в объединение. Символ в правой части означает одинаковость этого условия в данный момент времени для всех станций системы. Уравнение оправдливо для условия, когда активная и реактивная нагрузки системы не зависят от напряжения сети.

Сокращенная форма записи уравнения приростов. Выражение (1) это общеизвестное равенство относительных приростов расхода топлива, скорректированное на величину потерь электрической энергии в сети и энергетическую эффективность используемого ресурса.

Трудность практического использования этого условия заключается в том, что в процессе расчета необходимо вычислить следующие четыре частных производных потерь активной и реактивной мощностей:

$$\frac{\partial P_{\pi}}{\partial P_i}, \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial P_i}, \frac{\partial P_{\pi}}{\partial Q_i} \text{ и } \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial Q_i}. \quad (2)$$

Это приводит к увеличению машинного времени при расчетах на ЦВМ или сильно усложняет расчет при пользовании логарифмической линейкой.

Исследования, проведенные в Отделе энергетической кибернетики АН МССР, показали, что для однородных сетей произвольной конфигурации можно существенно упростить равенство (1). Упрощенная (сокращенная) запись уравнения наивыгоднейшего режима параллельной работы электростанций содержит не четыре, а только две частных производных по потерям энергии в сети, а именно:

$$\frac{\partial P_{\pi}}{\partial P_i} \text{ и } \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial Q_i}. \quad (3)$$

Первая из них в дальнейшем обозначается через σ_i и называется относительным приростом активных потерь, вторая обозначается через σ_i^Q и называется относительным приростом реактивных потерь.

Уравнение в этой записи имеет следующий вид:

$$\frac{\lambda_i b_i \pi_i (1 - \sigma_i^Q)}{1 - \sigma_i - \sigma_i^Q} = \text{idem}. \quad (4)$$

Упрощение записи не связано с потерей точности.

Доказательство. Пусть данная i -я станция связана с балансирующей точкой системы однородной сетью произвольной конфигурации. В этом случае потеря активной энергии будет равна:

$$P_{\pi} = \sum_{j=1}^n \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} R_j, \quad (5)$$

где n — число звеньев цепи между данной станцией и балансирующей точкой системы;

R — активное сопротивление участка цепи;

U — напряжение в точке замера мощности.

Частные производные от величины активных потерь мощности получим в результате дифференцирования выражения (5):

$$\frac{\partial P_{\pi}}{\partial Q_i} = 2 \sum_{j=1}^n \frac{Q_j R_j}{U_j^2} \cdot \frac{\partial Q_j}{\partial Q_i} \quad (6)$$

и

$$\frac{\partial P_{\pi}}{\partial P_i} = 2 \sum_{j=1}^n \frac{P_j R_j}{U_j^2} \cdot \frac{\partial P_j}{\partial P_i}. \quad (7)$$

Потери реактивной мощности между i -ой станцией и балансирующей точкой

$$Q_{\pi} = \sum_{j=1}^n \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} X_j, \quad (8)$$

где x — реактивное сопротивление участка цепи.

Частные производные от величины реактивных потерь в результате дифференцирования (8) имеют следующий вид:

$$\frac{\partial Q_{\pi}}{\partial P_i} = 2 \sum_{j=1}^n \frac{P_j X_j}{U_j^2} \cdot \frac{\partial P_j}{\partial P_i} \quad (9)$$

и

$$\frac{\partial Q_{\pi}}{\partial Q_i} = 2 \sum_{j=1}^n \frac{Q_j X_j}{U_j^2} \cdot \frac{\partial Q_j}{\partial Q_i}. \quad (10)$$

Сравнивая уравнения (1) и (4) нетрудно заметить, что они тождественно равны друг другу, если выполняется условие:

$$\frac{\partial P_{\pi}}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial P_i} = \frac{\partial P_{\pi}}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial Q_i}. \quad (11)$$

Правая часть этого уравнения, соответственно принятым обозначениям, равна произведению σ_i на σ_i^Q .

Следовательно, для доказательства справедливости уравнения (4) достаточно доказать справедливость уравнения (11).

Рассмотрим некоторую величину C , равную:

$$C = \frac{\partial P_{\pi}}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial P_i} - \frac{\partial P_{\pi}}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial Q_i}. \quad (12)$$

Она определится попарной подстановкой уравнений (6) и (9); (7) и (10) в уравнения (12)¹

$$C = 4 \left\{ \left[\sum_{j=1}^n \frac{Q_j R_j}{U_j^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_i X_i}{U_i^2} \right] - \left[\sum_{j=1}^n \frac{P_j R_j}{U_j^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_i X_i}{U_i^2} \right] \right\}. \quad (13)$$

Запишем в виде двойной суммы

$$C = 4 \left[\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{Q_j R_j P_i X_i}{U_j^2 U_i^2} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{P_i R_i Q_j X_j}{U_i^2 U_j^2} \right]; \quad (14)$$

Нетрудно заметить, что при однородной сети, для которой

$$R_j X_i = R_i X_j$$

выражение в квадратных скобках равно нулю.

Следовательно, условие (11) для однородной сети всегда выполняется. Подставляя (11) в (1) с учетом того, что

$$\frac{\partial P_{\pi}}{\partial P_i} = \sigma_i, \text{ а } \frac{\partial Q_{\pi}}{\partial Q_i} = \sigma_i^Q,$$

¹ Частные производные под знаком суммы в выражениях (6), (7) и (9), (10) есть коэффициенты распределения. В [Л. 1] убедительно показано, что для однородной сети их сумма может не учитываться. Поэтому в дальнейшем они опущены без какого бы то ни было пояснения.

получим:

$$\frac{\lambda_i b_i \pi_i}{1 - \sigma_i - \frac{\sigma_i \sigma_i^Q}{1 - \sigma_i^Q}} = \text{idem}, \quad (15)$$

откуда непосредственно следует выражение (4).

Если пренебречь величиной σ_i^Q , то²

$$\frac{\lambda_i b_i \pi_i}{1 - \sigma_i} = \text{idem}. \quad (16)$$

Сокращенная запись значительно упрощает расчет наивыгоднейшего распределения активной нагрузки между параллельно работающими электростанциями в сложной сети.

Выводы. Для однородной электрической сети условие наивыгоднейшего распределения нагрузки может быть значительно упрощено.

Упрощенная форма записи содержит только две частных производных потерь энергии в сети — относительный прирост активных потерь и относительный прирост реактивных потерь — вместо четырех.

Указанное сокращение произведено без ущерба для точности расчетов и без каких-либо дополнительных условий.

Сокращенная форма записи имеет более четкий физический смысл.

Литература

1. Маркович И. М., Режимы энергетических систем, Госэнергоиздат, 1963.
2. Горюштин В. М., Наивыгоднейшее распределение нагрузок между параллельно работающими электрическими станциями, Госэнергоиздат, 1949.
3. Шаханов В. С., Метод и алгоритм вычисления экономического распределения активных нагрузок в сложных гидро-тепловых энергосистемах на электронных цифровых машинах, Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, 1960, № 1.
4. Глазунов А. А. и Глазунов А. А., Электрические сети и системы, Госэнергоиздат, 1960.
5. Журавлев В. Г., Неучет относительного прироста потерь реактивной мощности в электрических сетях, «Энергетика и электротехническая промышленность», № 4, Киев, 1964.

[4.5.1964]

² Пренебрежение величиной σ_i^Q требует дополнительного обоснования. Исследования показывают, что это не всегда допустимо [Л. 5].



Трансформаторы с магнитной коммутацией витков регулируемых обмоток

Кандидат техн. наук В. А. ТРОИЦКИЙ

Узбекский научно-исследовательский институт энергетики и автоматики

К числу известных способов регулирования напряжения трансформаторов без разрыва цепи электрического тока должно быть добавлено регулирование при помощи магнитной коммутации витков регулируемых обмоток. Принципиальные схемы такого регулирования однофазных трансформаторов показаны на рис. 1. Здесь П-образный сердечник имеет на стержнях пазы, в которых располагается регулируемая обмотка. В окне трансформатора перемещается магнитный коммутатор¹, который перераспределяет витки регулируемой обмотки между двумя связанными контурами α и β . Обмотки по пазам могут быть распределены как равномерно, так и в соответствии с какими-либо законами $w_{p1,2}(y) = f_{1,2}(y)$. Одна из обмоток или ее часть может находиться вне пазов.

При неглубоком регулировании напряжения ($\pm 5 \div 10\%$) целесообразен предельный случай — только один паз, в котором находится 10—20% витков одной из обмоток (рис. 2).

Если обе обмотки находятся в одних пазах, то по условиям регулирования должно быть $w_{p1}(y) \neq w_{p2}(y)$, тогда как суммарные числа витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток могут быть равны друг другу. На рис. 1 показаны схемы замкнутого и разомкнутого сердечников, а также несколько вариантов расположения регулируемых и нерегулируемых обмоток. Пример неравномерного распределения обмоток по пазам приведен в табл. 1.

Таблица 1

| Номера стержней | Номера пазов | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----------------|--------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | Число витков первичной обмотки | 3 | 36 | 32 | 28 | 24 | 20 | 16 | 12 | 8 | 4 | 0 |
| | Число витков вторичной обмотки | 40 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 |
| 2 | Число витков первичной обмотки | 36 | 32 | 28 | 24 | 20 | 16 | 12 | 8 | 4 | 0 | 0 |
| | Число витков вторичной обмотки | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 0 |

Общая формула коэффициента трансформации холостого хода такого трансформатора может быть получена аналогично соотношениям для последова-

тельного соединения двух магнитных контуров [Л. 1 и 2]:

$$k_{210}(y) = \frac{k_{\alpha}(y) k_{\alpha\beta}(y) + k_{\beta}(y)}{k_{\alpha\beta}(y) + 1}. \quad (1)$$

Здесь

$$k_{\alpha}(y) = \frac{w_{2\alpha}(y)}{w_{1\alpha}(y)} + \frac{w_{2\beta}(y)}{w_{1\alpha}(y)}; \quad (2)$$

$$k_{\alpha\beta}(y) = \frac{w_{1\alpha}^2(y)}{w_{1\beta}^2(y)} \xi(y); \quad (3)$$

$$k_{\beta} = \frac{w_{2\beta}(y)}{w_{1\beta}(y)} + \frac{w_{2\alpha}(y)}{w_{1\beta}(y)} \frac{1}{\xi'(y)}; \quad (4)$$

$w_{1\alpha}(y)$, $w_{2\alpha}(y)$, $w_{2\beta}(y)$, $w_{1\beta}(y)$ — числа витков первичной и вторичной обмоток контуров α и β в положении y коммутатора;
 $\xi(y)$, $\xi'(y)$ — отношения магнитных сопротивлений отдельных участков магнитной цепи.

Из приведенных соотношений видно, что коэффициент трансформации (глубина регулирования $p_u = \frac{U_{2 \text{ макс}}}{U_{2 \text{ мин}}}$) зависит от суммарных чисел витков w_1 , w_2 и принятых распределений этих витков. По данным, полученным в УзНИИЭА, рассмотрим некоторые показатели таких трансформаторов².

Глубина регулирования y трансформатора с магнитной коммутацией (типа ТРМК) p_u может быть получена любая, если не накладывается каких-либо ограничений (например, по к. п. д., $\cos \phi_1$).

На рис. 3 показаны опытные характеристики трансформатора ТРМК-1/0,22 мощностью 1 кВА и с глубиной регулирования $p_u > 4$, первичная обмотка которого располагалась на ярме, а вторичная (регулируемая) — в пазах.

Из этих кривых следует, что глубокое регулирование при помощи магнитной коммутации витков регулируемых обмоток может производиться при практически неизменном и малом токе холостого хода (например, трансформаторы пп. 1—4, 5 и 6 в табл. 2).

В табл. 2 в качестве примера глубоко регулируемого автотрансформатора приводятся данные АТМКТ-100/0,5 мощностью 100 кВА, изготавливаемого Московским электрозаводом. Поскольку показатели сильно зависят от мощности, для сравнения приводятся данные серийных трансформаторов ТС-1,5/0,5 и АСО-0,5 соизмеримой мощности с ТРМК-1,2/0,22 (рис. 3 и 4) и трансформатора ТМ-100/0,5, имеющего одинаковую мощность с АТМКТ-100/0,5.

На рис. 4 (табл. 2, п. 4) приводятся характеристики другого трансформатора типа ТРМК мощ-

¹ Понятие «магнитный коммутатор» вводится в отличие от понятия «магнитный шунт», так как здесь подвижная часть сердечника изменяет числа витков, связанные с отдельными контурами.

² В изготовлении трансформаторов принимал участие П. К. Подосинников, в испытании — М. Х. Джалилов.

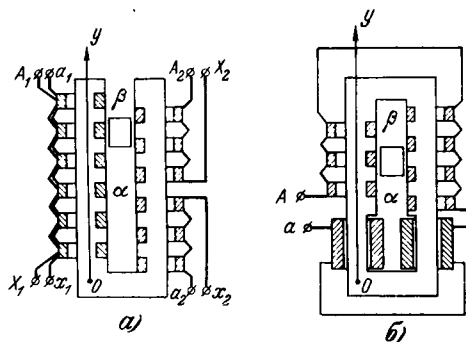
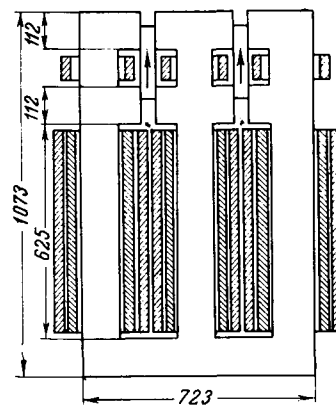


Рис. 1. Конструктивные схемы трансформатора с магнитной коммутацией витков регулируемых обмоток и варианты расположения обмоток на стержнях.

а — разомкнутый сердечник; б — замкнутый сердечник.

Рис. 2. Трансформатор типа ТРМК-180/6 для распределительных электрических сетей, регулируемый в пределах $\pm 5\%$ при помощи магнитной коммутации.



ностью 2 кВа, отличающегося от ТРМК-1/0,22 тем, что: 1) отношение высоты стержней к ширине окна здесь уменьшено примерно в 4,9 раза, 2) первичная и вторичная обмотки имеют примерно равные числа витков $\omega_1 \approx \omega_2$, но разные распределения вдоль оси Oy : $\omega_1(y) \neq \omega_2(y)$. В табл. 1 приводится распределение витков $\omega_1(y)$ и $\omega_2(y)$ по пазам стержней трансформатора ТРМК-2/0,22.

У трансформатора ТРМК-2/0,22 нельзя пренебречь проводимостью контура β из-за малого расстояния между стержнями, поэтому ток холостого хода здесь увеличивается с опусканием коммутатора (рис. 4, а), так как с уменьшением размеров контура α повышается магнитная проводимость контура β , через воздушный зазор которого замыкается поток $\Phi_\beta = \Phi_{\beta\kappa} + \Phi_{\beta\alpha}$ и часть потока $\Phi_\alpha = \Phi_{\alpha\kappa} + \Phi_{\alpha\beta}$. Суммарный поток $\Phi_\beta + \Phi_{\alpha\beta}$, пересекающий воздушный зазор β , возрастает с опусканием коммутатора, т. е. с приближением на рис. 4 у к значению $y_0 = a$.

На рис. 4 пунктиром проведены кривые для нерабочих положений коммутатора, в которых поток $\Phi_\beta + \Phi_{\alpha\beta}$ начинает превалировать над потоком $\Phi_{\alpha\kappa}$. В данном трансформаторе оказалось нецелесообразным приближать коммутатор к нижнему яру ближе чем на 9 см. Поэтому в этой части не следовало бы делать пазов, а обмотки надо было делать цилиндрическими, как у обычных нерегулируемых трансформаторов.

Таким образом, при регулировании с $p_u = 1,7 \div 1,5$ и при большом отношении высоты к ширине окна, равном 7—6, у трансформатора ТРМК-2/0,22 изменение тока холостого хода в рабочем диапазоне (сплошные линии на рис. 4) со-

ставляло примерно 30%. Следовательно, в зависимости от размеров окна ток намагничивания может быть практически неизменным (рис. 3, а) или увеличиваться с опусканием коммутатора (рис. 4, а).

Глубина регулирования не зависит от числа пазов. Например, трансформатор с одним пазом может иметь $p_u = 1,1 \div 1,25$ (рис. 2) и $p_u \approx \infty$ при расположении всей вторичной обмотки в верхнем пазу.

Из табл. 3 следует, что у трансформатора ТРМК $\cos \phi_1$ должен быть не ниже, чем у индукционных регуляторов [Л. 3] и трансформаторов с короткозамкнутой обмоткой (при равных мощностях).

Коэффициент полезного действия и $\cos \phi_1$ у ТРМК ниже, чем у нерегулируемых трансформаторов, за счет повышенного на 30—70% расхода стали, больших рассеяний и суммарного воздушного зазора.

Поддержанию небольшого воздушного зазора между коммутатором и сердечником при помощи направляющих, вынесенных из окна трансформатора, способствуют малые размеры коммутатора. В табл. 4 приводятся ориентировочные данные подвижных элементов устройств, используемых для бесконтактного плавного регулирования напряжения.

Дополнительный объем стали трансформатора ТРМК равен:

$$\Delta V_F \approx 2z_c b_z (S + h_z h_c) + S (A_K - A), \quad (5)$$

где z_c — число зубцов, имеющих размеры h_z , b_z , на одном стержне;

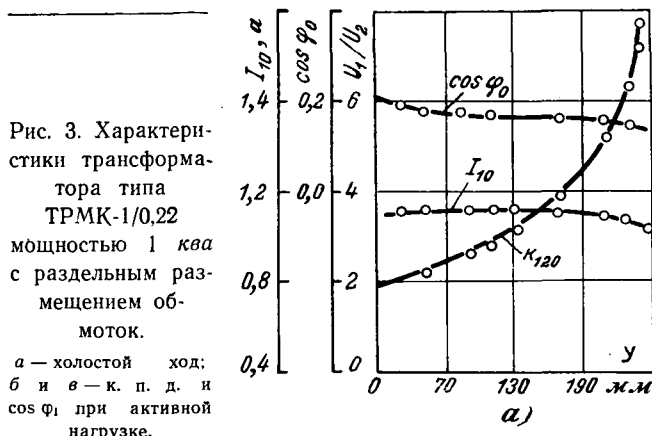


Рис. 3. Характеристики трансформатора типа ТРМК-1/0,22 мощностью 1 кВа с раздельным размещением обмоток.

а — холостой ход; б и в — к. п. д. и $\cos \phi_1$ при активной нагрузке.

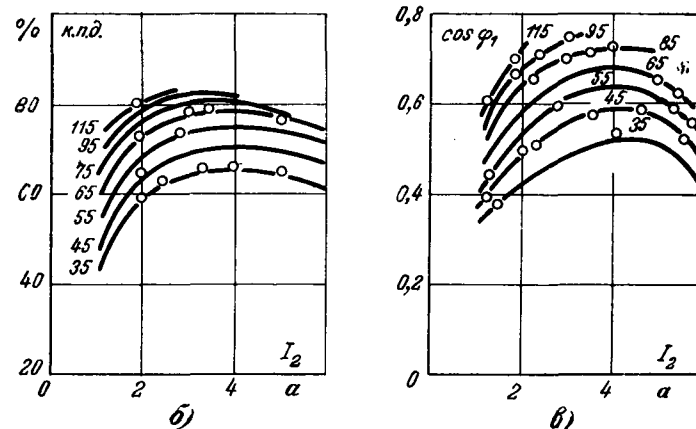


Таблица 2

| № п/п | Тип трансформатора | Мощность, <i>кв</i> | Напряжение, <i>в</i> | | К. п. д. при активной нагрузке, % | Ток холостого хода, % | В процентах от нерегулируемого трансформатора | | Способ регулирования |
|-------|--------------------|---------------------|----------------------|---------|-----------------------------------|-----------------------|---|----------------------------|---|
| | | | ВН | НН | | | Расход электротехнической стали | Расход обмоточного провода | |
| 1 | ТС-1,5/0,5 | 1,5 | 220 | 220 | 93 | 15 | 100 | 100 | Нерегулируемый |
| 2 | АОС-0,5 | 0,5 | 500/380 | 220/127 | 93 | 25 | 100 | 100 | Переключаемый |
| 3 | ТРМК-1/0,22 | 1 | 220 | 143—35 | 83—65 | 20—22 | 170 | 110 | Магнитная коммутация витков вторичной обмотки |
| 4 | ТРМК-2/0,22 | 2 | 220 | 250—150 | 88—75 | 25—35 | 130,7 | 110 | Магнитная коммутация витков первичной и вторичной обмоток |
| 5 | АТМКТ-100/0,5 | 100 | 380 | 220—35 | 92—78 | 32—43 | 200—250 | 200 | Подвижная короткозамкнутая обмотка |
| 6 | ТМ-100/0,5 | 100 | 500 | 230 | 97 | 6,5 | 100 | 100 | Нерегулируемый |

Таблица 3

| № п/п | Тип трансформатора | Мощность, <i>кв</i> | Глубина регулирования ρ_u | Коэффициент мощности при активной нагрузке $\cos \phi_1$ | Способ регулирования |
|-------|--------------------|---------------------|--------------------------------|--|-----------------------------|
| 1 | АТМКТ-100/0,5-А | 100 | 6,3 | 0,93—0,38 | Короткозамкнутая обмотка |
| 2 | МА195-99/25 | 190 | ∞ | Номинальный 0,51 | Индукционный регулятор |
| 3 | ТРМК-1/0,22 | 1 | 4 | 0,8—0,5 | Магнитная коммутация витков |
| 4 | ТРМК-2/0,22 | 2 | 1,7 | 0,93—0,7 | То же |

Таблица 4

| Способ регулирования или тип трансформатора | В процентах веса (объема) сердечника | |
|---|--------------------------------------|-------|
| | Вес | Объем |
| Короткозамкнутая катушка | 20 | 30 |
| Ротор индукционного регулятора | 35 | 35 |
| Подвижная часть сердечника шуб-трансформатора [Л. 4] | 80 | 60 |
| Вращающиеся стержни трансформатора Прюно ¹ | 85 | 70 |
| Магнитный коммутатор | 3—10 | 3—10 |

¹ Трансформатор, у которого при вращении стержней по спирали обмотки перемещается подвижной контакт.

ванием $\pm 5\%$, спроектированного на базе широко выпускаемого трансформатора ТСМА-108/6, приведена на рис. 2. В табл. 5 показаны некоторые данные ТСМА-180/6 и ТРМК-180/6.

Как видно из табл. 5 и рис. 2, плавное бесконтактное регулирование у ТРМК-180/6 получается ценой повышения расхода стали на 30%.

Трансформатор ТРМК-180/6 имеет следующие расчетные данные: ток холостого хода 8,15%, полное напряжение короткого замыкания 7,46%, из них активная составляющая 1,77%, потери холостого хода 1,04 *квт*, короткого замыкания 3,2 *квт*. Трансформатор ТСМА-180/6 имеет ток холостого хода 6%, полное напряжение короткого замыкания 4,78%, потери холостого хода 0,8 *квт*, короткого замыкания 3,2 *квт*.

Таблица 5

| Тип трансформатора | Глубина регулирования ρ_u | Вес сердечника, <i>кг</i> | Вес алюминия обмоток, <i>кг</i> | В процентах от ТСМА | | Способ регулирования |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------|---|
| | | | | Вес сердечника, % | Вес алюминия, % | |
| ТСМА-180/6 | 1,10 | 331,3 | 98,5 | 100 | 100 | Переключение витков с отключением от сети |
| ТРМК-180/6 ¹ | 1,10 | 431 | 98,8 | 130,2 | 100,3 | Магнитная коммутация |

¹ Проект выполнен Х. Абдусаматовым и А. Дадажановым.

S — примерно равные сечения ярма, коммутатора, стержня;

A_K — ширина окна (коммутатора);

A — расстояние между катушками соседних стержней у нерегулируемого трансформатора, относительно которого определяется ΔV_F . Реально сечение коммутатора в (5) больше, чем сечения стержней.

При исключении из конструкции ТРМК-2/0,22 лазов в нерабочей зоне (пунктирные линии на рис. 4) дополнительный расход стали ΔV_F по (5) у этого трансформатора в сравнении с нерегулируемым составит 36,7%, у ТРМК-1/0,22—70%. Расход провода у ТРМК (табл. 2 и 5) почти равен расходу провода у нерегулируемых трансформаторов.

У получивших распространение устройств, перечисленных в табл. 4, для регулирования напряжения расходы провода и стали составляют 250 и 200% по сравнению с аналогичными нерегулируемыми трансформаторами.

Принцип ТРМК [Л. 6—8] может быть использован в различных устройствах и трансформаторах (сварочные, дуговые, тяговые и пр.), в том числе в трансформаторах для распределительных сетей с глубиной регулирования $\rho_u = 1,05 \div 1,10$.

Сварочный трансформатор типа ТРМК, удовлетворяющий соответствующим требованиям [Л. 5], описан в [Л. 6]. Конструктивная схема трансформатора ТРМК мощностью 180 *кв*, 6 *кв* с регулиро-

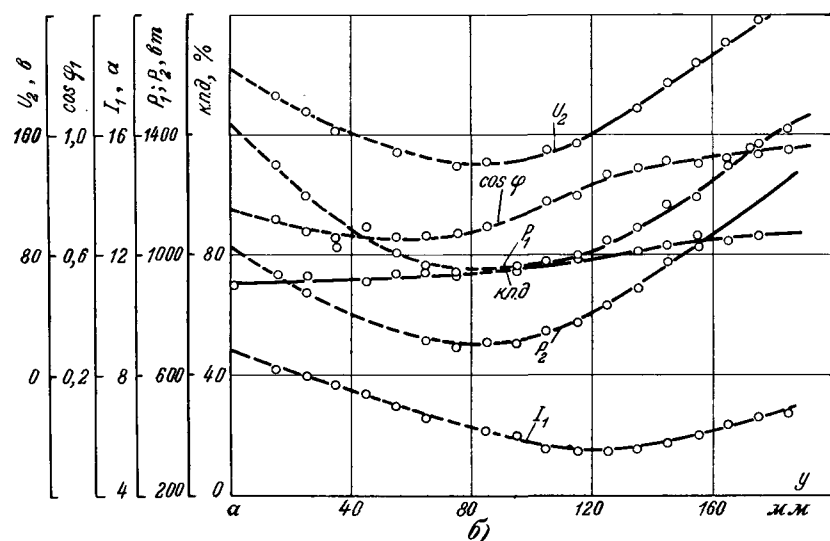
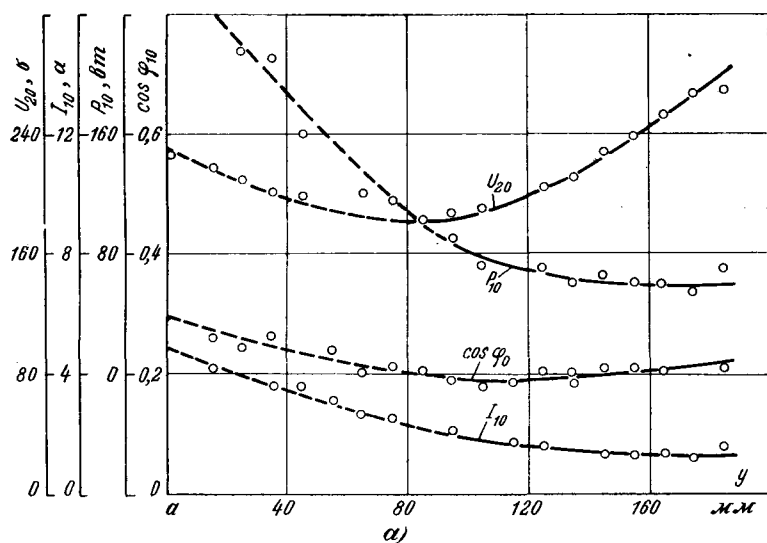


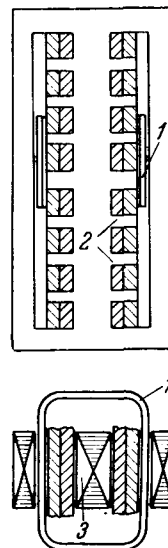
Рис. 4. Характеристики трансформатора типа ТРМК-2/0,22 мощностью 2 кВА с совмещенными в одних пазах обмотками в зависимости от положений y коммутатора.
 a — холостой ход; b — активная нагрузка.

Конструктивные элементы трансформатора ТРМК могут быть перенесены на другие плавно регулируемые трансформаторы [Л. 1, 9 и 10]. Так, если первичные и вторичные обмотки трансформаторов с короткозамкнутой катушкой расположить в пазах (рис. 5), то существенно снизится ток намагничивания этих трансформаторов. Совмещение магнитной коммутации с подмагничиванием [Л. 1 и 9] может обеспечить глубокое и быстрое регулирование без искажений формы кривой вторичного напряжения и т. д.

К недостаткам трансформатора ТРМК относятся необходимость жесткого закрепления стержней с целью фиксации воздушного зазора между коммутатором и стержнями; выполнение деталей, пересекающих воздушный зазор в контуре β из немагнитных материалов; повышенные требования к качеству крепления частей сердечника и к компенсаторам вибрации, предотвращающим появление

Рис. 5. Конструктивная схема трансформатора с короткозамкнутой обмоткой при расположении первичных и вторичных обмоток в пазах.

1 — короткозамкнутая обмотка; 2 — зубцы, монтируемые по мере укладки обмотки; 3 — стержень сердечника.



шумов. Подобные специфические особенности свойственны всем другим способам регулирования, перечисленным в табл. 4.

Выводы. Используя принцип магнитной коммутации, состоящий в изменении чисел витков регулируемых обмоток, находящихся в контуре основного магнитного потока, можно построить трансформаторы (ТРМК) с плавным бесконтактным регулированием напряжения и другие устройства.

В зависимости от глубины регулирования, принятых конструктивных решений показатели трансформаторов ТРМК изменяются, оставаясь соизмеримыми и превосходя показатели других устройств, используемых для аналогичных целей.

Литература

1. Петров Г. Н., Окунь С. С. и Сергеев Б. Н., Теоретические основы проектирования трансформаторов с плавным регулированием напряжения, Труды МЭИ, вып. 39, 1963.
2. Урманов Р. Н. и Павлов Ю. Ф., Особенности последовательной работы трансформаторов и расчет режимов, «Электричество», 1961, № 11.
3. Индукционные регуляторы напряжения, МА 195, каталог № 1618, ЦИТИЭлектропром.
4. Koch u. Sterzel A., Schubtransformatoren Schaltanlagen, Liste, т. VII, Ausgabe 1930, Dresden.
5. Рабинович П. Я., Оборудование для дуговой электрической сварки, Машгиз, 1958.
6. Троицкий В. А., Хамудханов М. З., Бергковский В. И. и Джалилов М. Н., Сварочный трансформатор с магнитной коммутацией, Известия АН УзССР, ОТН, 1964, № 1.
7. Троицкий В. А., Электромеханические функциональные преобразователи, «Электротехника», 1963, № 12.
8. Троицкий В. А., Трансформаторы с магнитной коммутацией как функциональные преобразователи, Сб. АН УзССР, ОТН, 1963.
9. Бамдас А. М., Сомов В. А. и Шмидт А. О., Трансформаторы и стабилизаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов, Госэнергоиздат, 1959.
10. Берштейн И. Я., и Лейтес Л. В., К расчету трансформаторов с передвижной короткозамкнутой обмоткой, «Электричество», 1959, № 5.

[3.7.1964]

Распределение потоков рассеяния и добавочные потери в стержнях мощных трансформаторов при нагрузке

Канд. техн. наук Э. А. МАНЬКИН, канд. техн. наук Д. Н. МОРОЗОВ и инж. А. В. АЛФЕРОВА

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Введение. До настоящего времени исследования распределения потоков рассеяния трансформаторов и вызываемых ими добавочных потерь проводились только применительно к условиям опыта короткого замыкания, когда основной поток практически равен нулю. Как распределяются потоки при нагрузке, когда существуют одновременно и потоки рассеяния и основной поток, не изменяются ли при этом добавочные потери в магнитопроводе — до настоящего времени не исследовалось.

В нашей работе о добавочных потерях в стержнях мощных трансформаторов в опыте короткого замыкания¹ было отмечено, что глубина проникновения радиальной составляющей потока в стержень растет с увеличением радиальной составляющей индукции рассеяния, что может быть объяснено насыщением поверхностных слоев пакетов стержня.

В автотрансформаторах большой мощности поток рассеяния особенно велик и в ряде случаев достигает 30—40% основного. При значительной реактивной составляющей тока нагрузки соответствующая часть потока рассеяния, совпадающая по фазе с основным потоком, может вызвать сильное насыщение крайних пакетов стержня, которые обычно занимают 12—15% периметра стержня. В них, следовательно, входит 12—15% потока рассеяния, вступающего в стержень. Так как поперечное сечение крайнего пакета составляет примерно 1% суммарного сечения стержня, то отношение суммарного потока в крайнем пакете к основному при указанных предположениях составило бы 1,5—2. Имелись опасения, что это может повлечь за собой увеличение глубины проникновения потока рассеяния и другие явления, приводящие к возрастанию добавочных потерь при реальной нагрузке по сравнению с условиями опыта короткого замыкания.

Объект исследования и методы измерений. Для исследования была использована та же модель, что и в первой работе, видоизмененная применительно к поставленной задаче: на один стержень рамы горизонтального магнитопровода была насажена (рис. 1) обмотка 1 для создания только основного потока. Другая обмотка 2, имевшая 64 витка и расположенная над вторым стержнем, создавала только поперечный поток рассеяния. Обе обмотки были подключены к одному и тому же источнику питания.

Вспомогательный стержень, на который была насажена возбуждающая обмотка 1, и ярма имели толщину вдвое большую, чем стержень с «рассеивающей» обмоткой 2, чтобы уменьшить необходи-

мую н. с. обмотки 1.

Так же, как и в некоторых трансформаторах большой мощности, крайний (верхний) пакет исследуемого стержня толщиной 15 мм был отделен от остальной части каналом 6 мм. Стержень был набран из листов горячекатаной стали толщиной 0,5 мм; ширина пластин 400 мм, толщина 50 мм. В ходе исследования крайний пакет заменялся на пакет из холоднокатаной стали марки Э-320 толщиной 0,5 мм, разрезанной на более узкие листы шириной 200 мм.

Максимальная радиальная индукция B_z под краем обмотки при токе в ней 2000 а составляла $5,5 \cdot 10^{-2}$ тл. Для усиления поперечного поля внутри рассеивающей обмотки были помещены полосы из электротехнической стали («магнитная вставка» сечением 5×40 см²). В этом случае уже при токе в обмотке 700 а значение $B_{м.ус}$ увеличилось до $8,8 \cdot 10^{-2}$ тл.

График распределения индукции вдоль стержня после введения «вставки» изменил свою форму (рис. 2). При этом поперечный поток рассеяния, вступающий в пакет, мог достигать 80% основного потока в нем. Индукция основного потока в тонком стержне регулировалась от 1 до 1,8 тл переключением числа секций обмотки 1 (рис. 1) при одном и том же напряжении. Переключение концов намагничивающей обмотки создавало согласное или встречное направление потока рассеяния и основного потока в стержне. Тем самым имитировалось подведение питания к внутренней или внешней обмотке трансформатора, а также условия индуктивной или емкостной нагрузки.

На рис. 3 представлены схемы направления потоков рассеяния Φ_r и основного Φ_0 при питании внутренней и внешней обмотки трансформатора.

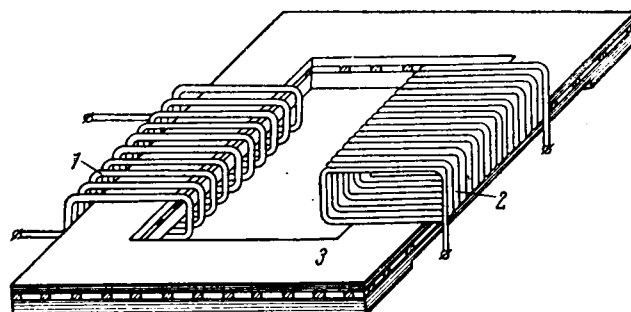


Рис. 1. Схематический эскиз модели для исследования потерь в стержне от поля рассеяния при нагрузке.
1 — «намагничивающая» обмотка; 2 — «рассеивающая» обмотка; 3 — магнитопровод.

¹ Манькин Э. А., Морозов Д. Н. и Алферова А. В. Добавочные потери в стержнях мощных трансформаторов при опыте короткого замыкания, «Электричество», 1964, № 12.

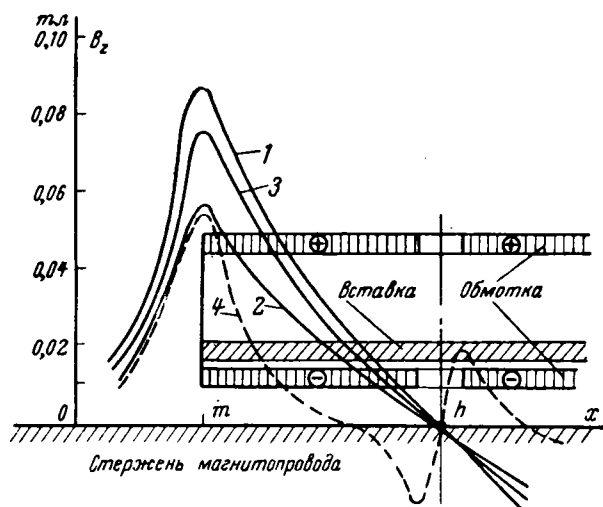


Рис. 2. Распределение поперечной составляющей индукции рассеяния $B_z(x)$ вдоль поверхности стержня. Показано сечение обмотки с «магнитной вставкой». 1 — основной поток отсутствует ($\Phi_0=0$); 2 — основной поток и поток рассеяния складываются ($\Phi_0+\Phi_p$); 3 — основной поток и поток рассеяния вычитаются ($\Phi_0-\Phi_p$); 4 — $\Phi_0=0$, «вставка» отсутствует. Сталь Э-420, $B_0=1,4-1,6$ тл.

Как видно из рис. 3,а, при питании внутренней обмотки, неизменном основном потоке и индуктивной нагрузке крайние пакеты стержня магнитопровода трансформатора подмагничиваются частью потока рассеяния, а участок ярма в это время размагничивается. При питании наружной обмотки (рис. 3,б) происходит обратный процесс — размагничивается стержень, подмагничивается ярмо. При емкостной нагрузке внутренняя и наружная обмотки как бы меняются ролями.

Для измерения добавочных потерь была использована схема, описанная в первой работе (см. выше). Измерение потерь от основного поля производилось малокоинусным ваттметром Д-522. При этом использовались измерительные обмотки, вмотанные как в намагничивающую, так и в рассеивающую обмотку.

Измерение электрической напряженности поля в листах пакета и измерение магнитных потоков осуществлялось по методике, описанной ранее.

Распределение поля около стержня и обмотки. Для определения влияния основного потока на распределение поля рассеяния у поверхности стержня были сняты графики распределения поперечной индукции вдоль него при встречном и согласном направлениях потока рассеяния и основного потока, а также при отсутствии последнего (рис. 2).

Из кривых на рис. 2 видно, что во всех случаях форма графика поперечной индукции вдоль стержня практически не меняется, тогда как величина индукции изменяется.

Измерения показали, что если при отсутствии основного потока максимальная усредненная по ширине пакета поперечная индукция $B_{м.ус}$ у поверхности пакета из горячекатаной стали составляла 0,088 тл, то при согласном направлении потоков рассеяния и основного она уменьшилась до 0,058 тл, т. е. на 34%. При встречном же направлении потоков индукция уменьшается только на 10%. Значительное уменьшение индукции рассея-

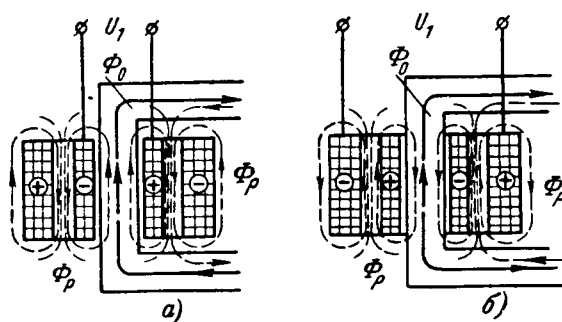


Рис. 3. Направление потока рассеяния и основного потока в участках магнитопровода.

а — при питании трансформатора со стороны внутренней обмотки; б — при питании трансформатора со стороны внешней обмотки (нагрузка индуктивная).

ния $B_{м.ус}$ при согласном направлении потоков можно объяснить тем, что верхний слой пакета оказывается сильно насыщенным, и его магнитное сопротивление становится соизмеримым с магнитным сопротивлением участка «торец обмотки — пакет». В результате значительно уменьшается доля потока рассеяния, входящего в пакет, а следовательно, и поперечная индукция. Аналогичная картина наблюдалась и с пакетом из холоднокатаной стали.

Распределение потоков в пакете стержня. Измерялась продольная индукция в пакете и затухание поперечных потоков по глубине пакета. Измерения проводились при различных графиках распределения индукции вдоль стержня, в пакетах шириной 400 мм из горячекатаной и 2×200 мм из холоднокатаной стали, при различных значениях максимальных поперечных индукций с основным потоком и без него. Индукция основного потока в пакете достигала 1,5—1,7 тл.

На рис. 4 показаны кривые изменения поперечных потоков на глубине пакета по отношению к потоку на поверхности Φ_{z0} (для всех случаев — при одинаковом токе в рассеивающей обмотке).

Для расчетов потерь кривые затухания потоков были перестроены в кривые относительного затухания квадратов потока и планиметрированием этих кривых получена эквивалентная толщина слоя потерь.

При согласном направлении потоков (для горячекатаной стали шириной 400 мм), как и ожидалось, наблюдается увеличение эквивалентной толщины слоя потерь до 1,0 см вместо 0,62 см при отсутствии основного потока. При встречном на-

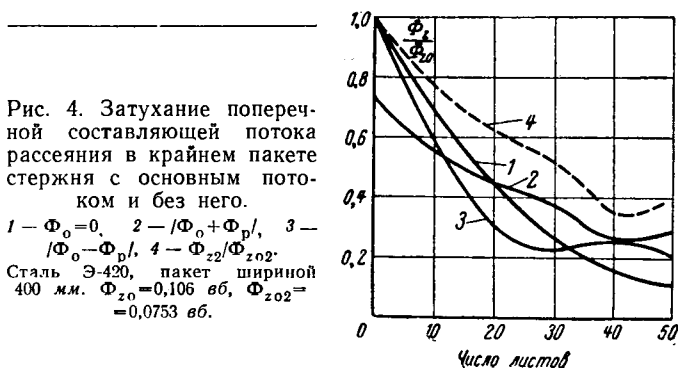


Рис. 4. Затухание поперечной составляющей потока рассеяния в крайнем пакете стержня с основным потоком и без него.
1 — $\Phi_0=0$, 2 — $\Phi_0+\Phi_p$, 3 — $\Phi_0-\Phi_p$, 4 — Φ_{z0}/Φ_{z02} .
Сталь Э-420, пакет шириной 400 мм. $\Phi_{z0}=0,106$ вб, $\Phi_{z02}=0,0753$ вб.

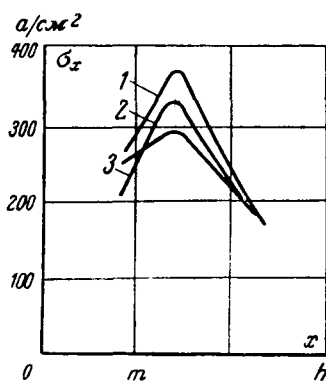


Рис. 5. Распределение плотностей вихревых токов вдоль края листа пакета стержня.

Сталь Э-420; ширина листов 400 мм. Распределение индукции по рис. 2. 1 — $\Phi_0 = 0$, 2 — $\Phi_0 + \Phi_p/2$, 3 — $\Phi_0 - \Phi_p/2$.

правлении потоков эквивалентная толщина уменьшается до 0,55 см. Аналогичное явление, но в меньшей степени, наблюдается в пакетах холоднокатаной стали шириной 2×200 мм: при согласном направлении — увеличение до 0,85 см (вместо 0,59 см при $\Phi_0 = 0$); при встречном — уменьшение до 0,55 см.

Добавочные потери в крайнем пакете стержня. При измерениях добавочных потерь в сердечнике использовалась та же схема с ламповым вольтметром (ВЗ-2А), что и в первой работе. Однако при согласном направлении потоков в пакете, вследствие сильного его насыщения, форма измеряемой э. д. с. сильно отличалась от синусоиды, что приводило к заведомо неправильным результатам измерения потерь. Схема давала правильные результаты, согласующиеся с данными других измерений, только при встречном направлении потоков или при отсутствии основного потока. Поэтому был использован малокосинусный ваттметр, при помощи которого лишь сравнивались потери при встречном и согласном направлениях основного потока и потока рассеяния с потерями при отсутствии основного потока, так как при весьма низком $\cos \phi$ ваттметр дает недостаточно точные показания. Кроме того, щупами измерялись максимальные плотности вихревых токов и поясом Роговского — вихревые токи в пакете. Пояс продевался через отверстие для шпильки в пакете и охватывал половину его сечения. Были также проведены расчеты, исходя из полученных в данной работе значений δ и $B_{м.ус}$. Как измерения, так и расчеты показали, что имевшиеся опасения об увеличении добавочных потерь в крайнем пакете стержня при наличии основного поля не подтвердились: хотя глубина «слоя потерь» и увеличивается, но этот эффект компенсируется снижением индукции рассеяния у поверхности стержня.

При встречном направлении потоков добавочные потери несколько уменьшаются (на 10—15%). Что касается удельных потерь на поверхности стержня, определяющих местный нагрев, то они связаны с максимальной плотностью вихревых токов. Как видно из измерений распределения плотностей вихревых токов вдоль края пакета (рис. 5), максимальные удельные потери при согласном направлении потоков значительно снижаются, а при встречном практически остаются неизменными по сравнению с потерями при $\Phi_0 = 0$. Отметим, что максимумы кривых плотности токов на рис. 5 сдвинуты

по оси x относительно максимумов индукции (точка m на рис. 2 и 5) вследствие несимметрии графиков $B_z(x)$ (кривые 1, 2 и 3), имеющих форму неравнобедренных треугольников.

Примеры расчетов и измерений максимальных удельных потерь на модели. Найдем максимальные удельные потери на краю первого пакета (горячекатаная сталь Э-42, 0,5 мм, шириной $2b_1 = 40$ см) при отсутствии основного потока. Распределение $B_z(x)$ представлено кривой 1 на рис. 2. Центр вихревых токов находится на расстоянии 10—12 см от максимума поля. Усредненная по ширине пакета индукция в этом месте по измерению составляет 0,062 тл. По формуле (2а) (см. сноску на стр. 68) при температуре 20° С максимальные удельные потери $p = 1300 B_{м.ус}^2 b_1^2$ вт/кг или (при пересчете на горячекатаную сталь): $p = 0,75 \cdot 1300 \cdot 0,062^2 \cdot 20^2 = 1500$ вт/кг (коэффициент 0,75 — отношение удельных сопротивлений холоднокатаной и горячекатаной стали). По измерениям при помощи щупов плотность вихревого тока составляет $\sigma = 373$ а/см². Удельные потери $p = \rho \frac{\sigma^2}{g}$ вт/кг ($\rho = 0,67 \cdot 10^{-4}$ ом·см — удельное сопротивление горячекатаной стали, $g = 7,6 \cdot 10^{-3}$ кг/см³ — удельный вес стали). Следовательно,

$$p_{изм} = \frac{0,67 \cdot 10^{-4} \cdot 373^2}{7,6 \cdot 10^{-3}} = 1230 \text{ вт/кг}.$$

Расхождение расчета и опыта может быть объяснено тем, что расстояние между щупами было 3 см, т. е. измерялась средняя плотность вихревого тока, а также погрешностями измерений при несинусоидальной индукции.

При встречном направлении основного потока и потока рассеяния $B_{м.ус} = 0,055$ тл; $p_{рас} = 1170$ вт/кг. По измерениям щупами получено $p_{изм} = 950$ вт/кг.

При согласном направлении основного потока и потока рассеяния $B_{м.ус} = 0,043$ тл; $p_{рас} = 720$ вт/кг. По измерениям щупами $p_{изм} = 705$ вт/кг.

Аналогичные измерения были проделаны и на пакете холоднокатаной стали толщиной 0,5 мм, шириной $2b_1 = 20$ см и дали такие же соотношения между $p_{изм}$ и $p_{рас}$.

Выводы. 1. В рабочем режиме основной поток и часть потока рассеяния, соответствующая реактивной составляющей тока нагрузки и проходящая по крайнему пакету стержня, направлены согласно или встречно в зависимости от подведения питания к наружной или внутренней обмотке трансформатора и характера нагрузки.

2. В режиме нагрузки при согласном направлении потоков глубина проникновения поперечного потока в крайний пакет увеличивается по сравнению с режимом короткого замыкания. Одновременно поле рассеяния перераспределяется так, что поперечная индукция на поверхности стержня снижается. В результате суммарные добавочные потери в нем при согласном направлении потоков практически остаются теми же, что при опыте короткого замыкания. При встречном направлении потоков поперечная индукция и потери немного снижаются.

3. В режиме нагрузки максимальные удельные потери, определяющие местный нагрев, не только не возрастают, но даже уменьшаются. Степень снижения зависит от того, какая из обмоток является намагничивающей (первичной), а также от величины и знака $\cos \phi$ нагрузки.

4. Для расчета потерь в режиме нагрузки можно пользоваться формулами, данными в первой работе (см. сноску), причем результаты будут несколько завышенными.

[15.2.1965]



Определение расчетного сопротивления петли зануления

Инж. П. И. СПЕВАНОВ

Украинский ГПИ Тязпромэлектропроект
Харьков

В действующих в настоящее время Правил устройства электроустановок для обеспечения безопасности людей в установках переменного тока напряжением до 1 000 в с глухим заземлением нейтрали требуется проверить все установленные в сети устройства защиты по условию отключения ближайшего однофазного короткого замыкания (при замыкании фазного провода на проводник зануления). В случаях, когда устройства защиты не обеспечивают отключение поврежденной линии из-за недостаточной чувствительности, необходимо либо увеличить проводимость проводника зануления, а иногда и фазного провода, либо предусмотреть специальную защиту нулевой последовательности, устанавливаемую в нейтрали силового трансформатора или в цепи линии. Основная трудность при определении тока замыкания заключается в оценке сопротивления петли зануления. При этом возникает необходимость в упрощении и уточнении некоторых положений расчетов (например, учет сопротивлений трансформаторов новых типов, учет параллельных ветвей в системе проводника зануления). Этому вопросу и посвящена настоящая статья.

Примем во внимание, что при расчетах токов короткого замыкания в сетях до 1 000 в комплексные сопротивления отдельных элементов петли зануления целесообразно представлять модулями полных сопротивлений [Л. 1 и 2], компенсируя погрешность введением поправочного коэффициента. Кроме того, примем напряжение на стороне 6—10 кВ силового трансформатора постоянным, а сопротивлениями второстепенных элементов низковольтных устройств (ошинок, контактов, обмоток трансформаторов тока и катушек автоматов) и электрической дуги в месте короткого замыкания пренебрежем. С учетом указанных допущений для обеспечения отключения защитным аппаратом тока однофазного замыкания достаточно выполнить условие

$$I_{с.з} \geq I_k^{(1)} = \frac{1,05 U_\phi}{z_\tau + \sum_{i=1}^m (z_{\pi i})_i}, \quad (1)$$

где $I_{с.з}$ — ток срабатывания защиты, установленный Правилами, а;

$I_k^{(1)}$ — расчетный ток однофазного короткого замыкания, а;

U_ϕ — фазное напряжение сети, в;

z_τ — расчетное (деленное на 3) полное сопротивление одной фазы обмотки силового трансформатора, ом;

m — количество участков поврежденной линии от низковольтных выводов трансформатора до места замыкания, имеющих разные комбинации фазных проводов и проводников зануления;

l — длина отдельных участков поврежденной линии, км;

z_π — полное сопротивление петли фаза-нуль отдельных участков поврежденной линии, ом/км;

1,05 — коэффициент, компенсирующий погрешность от арифметического сложения модулей сопротивлений в цепи зануления.

Выражение в знаменателе формулы (1) является расчетным сопротивлением петли зануления.

В табл. 1 приведены средние значения сопротивлений симметричных составляющих одной фазы обмотки стандартных трансформаторов с медными проводами (тип ТМ) и с алюминиевыми проводами (тип ТМА с сердечником из горячекатаной стали и тип ТСМА с сердечником из холоднокатаной стали). Для трансформаторов с фланцами (ТМФ и ТМАФ), устанавливаемых в комплектных подстанциях, сопротивление велико из-за более высокого насыщения стенок бака и дополнительных потерь в стали.

При использовании для путей зануления проводников из стали (например, подкрановые двутавровые балки, стропильные фермы зданий, обрамления угловой стальной кабельных каналов, специально прокладываемые стальные полосы) определение полного сопротивления петли фаза-нуль z_π усложняется из-за необходимости учета коэффициента скин-эффекта, значение которого зависит от значения искомого тока короткого замыкания.

Полное сопротивление петли фаза-нуль существенно зависит от внешнего реактивного сопротивления, наибольшее значение которого имеет место в тех случаях, когда в качестве основных проводников зануления используются металлоконструкции зданий, удаленные от линий на большие расстояния.

Для сетки стальных металлоконструкций невозможен точный учет всех факторов, обусловленных скин-эффектом и внешней реактивностью. Значение эквивалентного сопротивления петли фаза-нуль в этом случае можно оценить лишь приближенно, приняв некоторые допущения. Во-первых, следует учесть, что из-за возникновения весьма большого внешнего реактивного сопротивления ток однофазного короткого замыкания стремится возвратиться к источнику по пути, ближайшему к фазному проводу, несмотря на более низкое активное сопротивление удаленного проводника. В этом случае роль удаленных проводников зануления в снижении сопротивления петли фаза-нуль оказывается незначительной. Во-вторых, с уменьшением токов, проходящих по удаленным металлоконструкциям, из-за более сильного проявления скин-эффекта увеличиваются активное и внутреннее реактивное сопротивления стали. В результате роль удаленных металлоконструкций в снижении полного сопротивления петли фаза-нуль будет еще менее заметной. С учетом сказанного можно для практических целей существенно

Таблица 1

Расчетное сопротивление трансформатора, ом

| Тип трансформатора и мощность, кВА | Сопротивление одной фазы обмотки силового трансформатора со схемой соединения звезда/звезда, ом | | | | | | |
|---|--|-------------------|----------------------------|------------|----------------------------------|------------|--------|
| | прямой и обратной последовательности | | нулевой последовательности | | полное расчетное (деленное на 3) | | |
| | активное | реактивное | активное | реактивное | активное | реактивное | полное |
| | $r_{1T} = r_{2T}$ | $x_{1T} = x_{2T}$ | r_{0T} | x_{0T} | r_T | x_T | z_T |
| ТМ-20 | 0,24 | 0,369 | 1,05 | 3,34 | 0,51 | 1,359 | 1,452 |
| ТМ-30 | 0,119 | 0,254 | 1,56 | 1,98 | 0,599 | 0,829 | 1,023 |
| ТМ-50 | 0,085 | 0,154 | 0,818 | 1,62 | 0,329 | 0,643 | 0,722 |
| ТМА-60 | 0,057 | 0,131 | 1,52 | 1,48 | 0,545 | 0,581 | 0,797 |
| ТСМА-60 | 0,044 | 0,102 | 0,58 | 1,18 | 0,223 | 0,461 | 0,512 |
| ТМ-100 | 0,038 | 0,079 | 0,427 | 0,79 | 0,168 | 0,316 | 0,358 |
| ТМА-100 | 0,026 | 0,08 | 1,19 | 0,96 | 0,414 | 0,373 | 0,557 |
| ТСМА-100 | 0,023 | 0,07 | 0,64 | 0,84 | 0,229 | 0,327 | 0,399 |
| ТМ-180 | 0,020 | 0,044 | 0,276 | 0,435 | 0,1053 | 0,1743 | 0,204 |
| ТМ-320 | 0,0095 | 0,026 | 0,174 | 0,242 | 0,0643 | 0,098 | 0,117 |
| ТМ-400 | 0,0058 | 0,017 | 0,165 | 0,231 | 0,0589 | 0,0883 | 0,106 |
| ТМФ-400 | 0,0058 | 0,017 | 0,183 | 0,257 | 0,0649 | 0,097 | 0,117 |
| ТМ-560 | 0,0044 | 0,014 | 0,14 | 0,18 | 0,0496 | 0,0693 | 0,087 |
| ТМ-630 | 0,0032 | 0,0136 | 0,137 | 0,174 | 0,0478 | 0,0671 | 0,082 |
| ТМФ-630 | 0,0032 | 0,0136 | 0,153 | 0,194 | 0,0531 | 0,0737 | 0,091 |
| ТМ-750 | 0,0030 | 0,0103 | 0,100 | 0,120 | 0,0353 | 0,0469 | 0,059 |
| ТМ-1000 | 0,0021 | 0,0086 | 0,071 | 0,083 | 0,0251 | 0,0334 | 0,042 |
| ТМА-1000 | 0,0021 | 0,0086 | 0,12 | 0,14 | 0,0414 | 0,0524 | 0,067 |
| ТМАФ-1000 | 0,0021 | 0,0086 | 0,13 | 0,155 | 0,0447 | 0,0574 | 0,073 |

Примечание. Для составления таблицы использованы данные Московского и Хмельницкого трансформаторных заводов и опытные данные [Л. 3 и 5]. Расчеты произведены по формуле

$$z_T = r_T + jx_T = \frac{1}{3} [(2r_{1T} + r_{0T}) + j(2x_{1T} + jx_{0T})].$$

упростить расчеты по определению сопротивления петли фаза-нуль, если во всех случаях предусматривать не более двух проводников зануления, ближайших к фазному проводу. При таком допущении остальные, более удаленные параллельные связи будут в резерве расчета, причем резерв расчета тем меньше, чем больше удалены от фазного провода исключенные из расчета проводники зануления. Резервом расчета являются также пути отсоса тока в землю.

Для наиболее простого случая петли фаза-нуль, имеющей в составе проводника зануления не более двух параллельных связей, могут быть применены следующие приближенные формулы.

а) Петля имеет один нерасщепленный проводник зануления (рис. 1):

$$z_{\Pi} = z_1 + z_2 = (r_1 + r_2) + j(2x'_{12} - x'_1 - x'_2 + x''_1 + x''_2), \quad (2)$$

где

$$[z_1 = r_1 + j(x'_{12} - x'_1 + x''_1); \quad (3)$$

$$z_2 = r_2 + j(x'_{12} - x'_2 + x''_2). \quad (4)$$

б) Петля имеет проводник зануления, расщепленный на две параллельные ветви (рис. 2):

$$z_{\Pi} = z_1 + \frac{z_2 z_3}{z_2 + z_3}, \quad (5)$$

где

$$z_1 = r_1 + j(x'_{12} + x'_{13} - x'_{23} - x'_1 + x''_1); \quad (6)$$

$$z_2 = r_2 + j(x'_{12} + x'_{23} - x'_{13} - x'_2 + x''_2); \quad (7)$$

$$z_3 = r_3 + j(x'_{13} + x'_{23} - x'_{12} - x'_3 + x''_3). \quad (8)$$

В формулах (2) — (8):

z_{Π} — полное сопротивление петли фаза-нуль, ом/км ;

z_1, z_2 и z_3 — полное сопротивление фазного провода z_1 и параллельных связей проводников зануления z_2 и z_3 , ом/км ;
 r_1, r_2, r_3 и x''_1, x''_2, x''_3 — активное и внутреннее реактивное сопротивление проводников петли, ом/км ;
 x'_1, x'_2 и x'_3 — собственное внешнее реактивное сопротивление проводников петли, ом/км ; для n -го проводника

$$x'_n \approx 0,145 \lg r_{3n},$$

где r_{3n} — эквивалентный радиус проводника n в системе петли, мм (табл. 2);
 x'_{12}, x'_{13} и x'_{23} — внешние сопротивления (взаимоиндукции) в системе петли, ом/км ; для двух проводников

$$x'_{nn} \approx 0,145 \lg d_{nn},$$

где d_{nn} — среднее геометрическое расстояние между проводниками в системе петли, мм (табл. 3).

На основании практики применения формул (2) — (8) можно сделать следующие рекомендации по определению сопротивления петли фаза-нуль для разных линий.

1. Прокладка кабеля с алюминиевой оболочкой. В этом случае отсос тока замыкания через внешние стальные конструкции (при наличии их) незначителен из-за большого значения реактивного сопротивления петли фаза-металлоконструкция. Специальная прокладка стальных полос в качестве про-

водников зануления также не обеспечит существенного уменьшения сопротивления петли фаза-нуль. В связи с этим в кабельных сетях с алюминиевой оболочкой во всех случаях достаточно включать в расчет только сопротивление петли фаза-оболочка без учета влияния внешних металлоконструкций. Во взрывоопасных помещениях в качестве основных проводников зануления (в связи с запрещением применения для этой цели алюминиевых оболочек кабелей) должны использоваться только нулевые жилы четырехжильных кабелей или нулевые провода четырехпроводных линий в трубах. Реак-

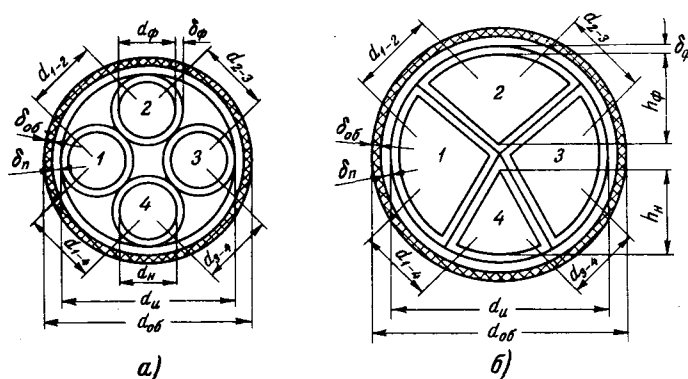


Рис. 3. Конструктивные элементы четырехжильного кабеля с бумажной изоляцией.

а — с круглыми жилами; б — с секторными жилами; $d_{об}$ — внешний диаметр металлической оболочки; d_u — диаметр кабеля под поясной изоляцией; δ_n — толщина поясной изоляции; $\delta_{об}$ — толщина металлической оболочки; δ_f — толщина фазовой изоляции; d_f и d_n — диаметры основной токоведущей и нулевой жил кабеля; h_f и h_n — высота сектора токоведущей и нулевой жил кабеля.

Таблица 2

Эквивалентные радиусы проводников $r_{э.н}$ (размеры в миллиметрах)

| Проводник | Расчетная формула для n -го проводника |
|---|--|
| Фазный провод (жила кабеля) круглого сечения, диаметр d_f | $0,3894 d_f$ |
| Нулевой провод (жила кабеля) круглого сечения, диаметр d_n | $0,3894 d_n$ |
| Фазная жила трехжильного кабеля секторного сечения, высота сектора h_f | $0,498 h_f$ |
| То же, но для четырехжильного кабеля | $0,459 h_f$ |
| Нулевая жила четырехжильного кабеля секторного сечения, высота сектора h_n | $0,378 h_n$ |
| Металлическая оболочка кабеля или стальная труба проводки, имеющие наружный диаметр d | $0,45 d$ |
| Полоса (шина) прямоугольного сечения (ширина a , толщина b) | $0,2236 (a + b)$ |
| Двутавровая сталь (ширина a , высота h) | $0,25 (a + h)$ |
| Угловая сталь (ширина a , высота h) | $0,20 (a + h)$ |

тивное сопротивление петли фаза-оболочка трехжильного кабеля не превышает $0,1 \text{ ом/км}$, и им можно пренебречь. Сопротивление петли фаза-нуль четырехжильного кабеля может быть представлено также только активной составляющей.

2. Прокладка трехжильных кабелей с неметаллической оболочкой. При применении кабеля с неметаллической оболочкой необходимо в первую очередь для зануления учитывать проводимость металлоконструкций зданий. В производственных цехах с наличием массивных металлоконструкций специальная прокладка стальных зануляющих полос небольшого сечения ($40 \times 4 \text{ мм}$) не даст ожидаемого

Таблица 3

Средние геометрические расстояния петли фаза-нуль, $d_{нн}$ (размеры в миллиметрах)

| № п/п. | Линия | Расчетная формула |
|--------|---|--|
| 1 | Воздушные линии, открытые проводки и шинопроводы, трехжильные кабели без металлической оболочки, проводки в неметаллических трубах, имеющие фазные проводники A, B, C и нулевые (зануляющие) проводники H | $d_{ф-н} = \sqrt[3]{d_{a-н} d_{b-н} d_{c-н}}$ |
| | При значительном удалении проводника зануления H от фазных проводов линии A | $d_{ф-н} = d_{a-н}$ |
| 2 | Трехпроводные линии, проложенные в стальной трубе, используемой в качестве проводника зануления, имеющей внутренний диаметр d_b и наружный d | $d_{ф-т} \approx 0,25 (d_b + d)$ |
| 3 | Трехжильные кабели с неметаллической оболочкой и трехпроводные линии в неметаллических трубах с использованием в качестве проводников зануления различных металлоконструкций (находящихся от линии на расстоянии $d_{ф-м}$) | $d_{ф-м}$ |
| 4 | Четырехжильные кабели (рис. 3) с расстоянием между круглыми жилами $d_{1-4} = d_{3-4} = \frac{1}{2} (d_f + d_n + 4 \delta_f)$ и $d_{2-4} = d_u - d_{1-4}$ и между секторными жилами $d_{1-4} = d_{3-4} \approx 0,398 d_u$ и $d_{2-4} \approx 0,497 d_u$ | $d_{ф-об} \approx 0,5 d_u + \delta_n + 0,5 \delta_{об}$ $d_{ф-н} \approx \sqrt[3]{2 d_{1-4} d_{2-4}}$ |
| 5 | Трехжильные кабели (в качестве проводника зануления используется алюминиевая оболочка) | $d_{ф-об} \approx 0,5 d_u + \delta_n + 0,5 \delta_{об}$ |

эффекта, так как отсос незначительной части тока замыкания через полосу не окажет заметного влияния на снижение сопротивления петли фаза-нуль. Однако прокладка стальных полос большего сечения (с проводимостью по полному току замыкания) может быть экономически оправдана лишь в зданиях, не имеющих массивных металлоконструкций, либо во взрывоопасных помещениях, в которых подобные металлоконструкции Правила допускают использовать только в качестве резервного мероприятия. При ширине петли фаза-металлоконструкция в пределах 0,4—20 м внешнее реактивное сопротивление петли изменяется от 0,7 до 1,25 ом/км и оказывает заметное влияние на полное сопротивление петли, особенно при больших сечениях фазных жил кабелей и металлоконструкций, имеющих малое активное сопротивление. При учете двух параллельных ветвей из стали в цепи проводника зануления по формулам (5)—(8) внешнее реактивное сопротивление петли фаза-нуль несколько уменьшается.

3. Прокладка проводников в стальных трубах. Особенностью трубных проводок в зданиях с наличием строительных металлоконструкций является почти полное отсутствие внешнего реактивного сопротивления петли фаза-металлоконструкция. Отсутствует также заметное снижение активной прово-

димости петли зануления за счет использования внешних металлоконструкций. Как показывают исследования [Л. 5 и 6], для электропроводок в герметических стальных трубах в случае замыкания фазы на металл трубы внутри самой трубы из-за явления скин-эффекта ток замыкания проходит не по внешнему слою, как в полосе, а только по тонкому внутреннему слою металла трубы. Электромагнитные поля тока фазного провода и обратного тока трубы, взаимодействуя друг с другом, как бы «утягивают» ток на внутреннюю поверхность трубы, отчего внешняя поверхность полностью лишается тока. В результате ток не может проходить по другим проводникам, расположенным вне трубы. Из-за экранирующего действия кольцевого тока провода трубы основным проводником зануления должна приниматься только та труба, в которой находится поврежденный провод. При этом внешним реактивным сопротивлением фаза-труба можно пренебречь, так как оно существенно меньше внутреннего реактивного сопротивления самой трубы. В связи с тем, что Правила устройства электроустановок не допускают использование стальных труб во взрывоопасных помещениях в качестве основных проводников зануления, и учитывая, что прокладка специальных зануляющих стальных полос вне трубы неэффективна, следует в этих случаях при про-

Таблица 4

Полное расчетное сопротивление петли фаза-нуль z_{Σ} трехжильного кабеля с алюминиевыми жилами при использовании различных проводников зануления, ом/км

| № п/п | Проводник зануления | Расчетный ток однофазного короткого замыкания, а | Количество и сечение жил кабеля, мм ² | | | | | | |
|-------|--|--|--|------|------|------|------|------|------|
| | | | 3×10 | 3×16 | 3×25 | 3×35 | 3×50 | 3×70 | 3×95 |
| 1 | Двутавровая балка № 45, 450×160 мм, на расстоянии 15 м от кабеля в пластмассовой оболочке | 1 000 | 4,37 | 2,97 | 2,17 | 1,78 | 1,52 | 1,36 | 1,25 |
| | | 1 400 | 4,33 | 2,92 | 2,12 | 1,74 | 1,47 | 1,31 | 1,21 |
| | | 2 100 | 4,28 | 2,88 | 2,07 | 1,69 | 1,42 | 1,26 | 1,16 |
| | | 3 500 | 4,23 | 2,82 | 2,01 | 1,63 | 1,36 | 1,21 | 1,11 |
| 2 | Стропильная ферма из угловой стали 2 (75×75×8) мм на расстоянии 20 м от кабеля в пластмассовой оболочке | 200 | 4,58 | 3,20 | 2,41 | 2,03 | 1,77 | 1,61 | 1,51 |
| | | 900 | 4,35 | 2,97 | 2,17 | 1,80 | 1,55 | 1,39 | 1,3 |
| | | 1 200—2 500 | 4,31 | 2,92 | 2,13 | 1,76 | 1,50 | 1,35 | 1,26 |
| | | | | | | | | | |
| 3 | Верхнее обрамление кабельного канала угловой сталью 50×50×5 мм (сечение канала 0,8×0,9 м, кабель в пластмассовой оболочке) | 200 | 5,03 | 3,61 | 2,78 | 2,38 | 2,08 | 1,89 | 1,76 |
| | | 400 | 4,71 | 3,18 | 2,46 | 2,04 | 1,75 | 1,56 | 1,43 |
| | | 800 | 4,51 | 3,09 | 2,25 | 1,83 | 1,54 | 1,35 | 1,23 |
| | | 1 200 | 4,40 | 2,97 | 2,13 | 1,72 | 1,42 | 1,23 | 1,11 |
| 4 | Алюминиевая оболочка кабеля | 2 000 | 4,35 | 2,92 | 2,08 | 1,66 | 1,36 | 1,17 | 1,05 |
| | | | 4,77 | 3,2 | 2,24 | 1,73 | 1,27 | 0,97 | 0,78 |
| | | 200 | 6,53 | 5,16 | 4,36 | 3,96 | 3,67 | 3,48 | 3,36 |
| | | 350 | 5,90 | 4,63 | 3,72 | 3,32 | 3,03 | 2,84 | 2,72 |
| 5 | Стальная полоса 40×4 мм на расстоянии 0,8 м от кабеля в пластмассовой оболочке | 2 500 | 5,54 | 4,15 | 3,34 | 2,95 | 2,66 | 2,47 | 2,35 |
| | | 200 | 6,07 | 4,69 | 3,88 | 3,49 | 3,20 | 3,01 | 2,89 |
| | | 500 | 5,28 | 3,89 | 3,07 | 2,67 | 2,38 | 2,20 | 2,08 |
| | | 2 500 | 5,10 | 3,70 | 2,88 | 2,48 | 2,19 | 2,0 | 1,88 |
| 6 | То же, но стальная полоса 60×4 мм | 200 | 5,69 | 4,29 | 3,47 | 3,07 | 2,77 | 2,58 | 2,45 |
| | | 500 | 5,10 | 3,70 | 2,88 | 2,48 | 2,19 | 2,0 | 1,88 |
| | | 800 | 4,94 | 3,53 | 2,71 | 2,40 | 2,02 | 1,83 | 1,71 |
| | | 2 500 | 4,86 | 3,45 | 2,63 | 2,23 | 1,94 | 1,75 | 1,63 |
| 7 | То же, но стальная полоса 80×4 мм | 200 | 5,45 | 4,05 | 3,24 | 2,84 | 2,55 | 2,36 | 2,24 |
| | | 500 | 4,99 | 3,59 | 2,76 | 2,36 | 2,07 | 1,88 | 1,76 |
| | | 900 | 4,75 | 3,33 | 2,51 | 2,10 | 1,81 | 1,62 | 1,50 |
| | | 2 500 | 4,69 | 3,28 | 2,45 | 2,05 | 1,76 | 1,57 | 1,45 |
| 8 | То же, но стальная полоса 100×4 мм | 200 | 5,45 | 4,05 | 3,24 | 2,84 | 2,55 | 2,36 | 2,24 |
| | | 500 | 4,99 | 3,59 | 2,76 | 2,36 | 2,07 | 1,88 | 1,76 |
| | | 900 | 4,75 | 3,33 | 2,51 | 2,10 | 1,81 | 1,62 | 1,50 |
| | | 2 500 | 4,69 | 3,28 | 2,45 | 2,05 | 1,76 | 1,57 | 1,45 |

Примечания: 1. Активные сопротивления фазной жилы и оболочки кабеля приняты при рабочей температуре 80° С, стальных токопроводов — при температуре окружающего воздуха 40° С. Активное сопротивление стали в зависимости от значения тока определялось по методике, данной [Л.11]. Удельное сопротивление при 20° С принято для двутавровой стали, имеющей большое содержание углерода, 200 ом/мм²/км, для угловой стали 145 ом·мм²/км и для алюминиевой жилы и оболочки кабеля 31,4 ом·мм²/км.

2. Значения z_{Σ} для промежуточных значений токов, проходящих по стальным проводникам зануления, следует определять интерполяцией.

3. Значения z_{Σ} , указанные в поз. 3, вычислены по формуле (5); для остальных случаев — по формуле (2).

Таблица 5

Влияние ширины петли на полное расчетное сопротивление петли фаза-нуль

| Количество и сечение жил кабеля, мм ² | 3×6 | | | | 3×240 | | | |
|---|------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| | 200 | | 2500 | | 200 | | 2500 | |
| Ток однофазного короткого замыкания, а | | | | | | | | |
| Размер стальной полосы, мм | 40×4 | 100×4 | 40×4 | 100×4 | 40×4 | 100×4 | 40×4 | 100×4 |
| Полное расчетное сопротивление петли фаза-но- лоса, ом/км: | | | | | | | | |
| при ширине петли 0,1 м | 8,98 | 7,95 | 7,97 | 7,21 | 2,98 | 1,87 | 1,97 | 1,07 |
| 0,8 м | 9,03 | 7,99 | 8,07 | 7,25 | 3,14 | 2,02 | 2,14 | 1,25 |
| 5,0 м | 9,09 | 8,05 | 8,12 | 7,28 | 3,29 | 2,25 | 2,30 | 1,43 |

Примечания: 1. См. примечание 1 к табл. 4.

2. Для промежуточных сечений кабелей и полос и токов замыкания сопротивления должны быть определены расчетом по формуле (2).

кладке в стальных трубах предусматривать только четырехпроводные линии с использованием четвертого провода в качестве основного проводника зануления.

Выводы, сделанные для проводов в стальной трубе, в основном распространяются на случаи прокладки кабелей со стальной броней и прокладки закрытых шинпроводов в стальном кожухе [Л. 7].

4. Четырехпроводные воздушные линии и открытые проводки на изоляторах. Рекомендации по расчету петли фаза-нуль в четырехпроводных сетях приведены в [Л. 8]. Для протяженных воздушных линий дополнительно по методике [Л. 9] необходимо учесть влияние повторных заземлений нулевого провода на уменьшение сопротивления петли фаза-нуль в зависимости от длины и количества воздушных линий, отходящих от подстанции, и от размещения и числа повторных заземлений.

Приложение. Для проверки на отключение устройства защиты линии, состоящей из комбинации фазных и зануляющих проводников, имеющих неодинаковое сечение и металл, целесообразно воспользоваться методикой, приведенной в [Л. 8 и 10]. При выборе стального проводника на ближайшем к подстанции участке по току замыкания на корпус в конце этого участка необходимо учитывать, что сопротивление проводника из стали может возрасти при пробое на корпус в более удаленной точке сети в результате прохождения меньших токов замыкания, при которых явление скин-эффекта выражено сильнее (табл. 4). Для упрощения расчетов целесообразно построить серию вспомогательных таблиц, подобных табл. 4, с готовыми значениями полного сопротивления петли фаза-нуль для разных комбинаций линий и проводников зануления.

Из анализа табл. 4 следует, что сопротивление петли фаза-металлоконструкция на 1 км длины больше, чем сопротивление петли фаза-алюминиевая оболочка кабеля сечением выше 3×35 мм². В этом случае использование алюминиевой оболочки кабеля в качестве проводника зануления дает больше гарантии отключения протяженной линии при однофазном коротком замыкании, чем использование для этой цели металлоконструкций зданий. Однако при сечениях кабеля ниже 3×35 мм² и токах замыкания более 1000 а применение кабелей в пластмассовой оболочке с использованием в качестве путей зануления металлоконструкций зданий будет более эффективно, чем использование для зануления алюминиевой оболочки кабеля. Использование стальных полос, предназначенных для целей зануления кабелей в пластмассовой обо-

лочке, не дает преимуществ (по сравнению с алюминиевой оболочкой) даже при прокладке полос сечением более 100×4 мм.

При использовании стальных полос в качестве проводников зануления Правила рекомендуют прокладывать их совместно или в непосредственной близости с кабелем. Опыт показывает, что эта рекомендация не всегда выполнима из-за конструктивных соображений и монтажных условий. Необходимо в Правилах вместо указанной рекомендации требовать соблюдения максимально допустимой расчетной ширины петли, обусловленной расчетным сопротивлением петли фаза-нуль (табл. 5).

Литература

1. Найфельд М. Р. и Зак С. М., Учет сопротивления трансформаторов при определении сопротивления петли фаза-нуль, «Электричество», 1955, № 10.
2. Глазунов А. А. и Фокин Ю. А., О расчетах токов коротких замыканий в электрических сетях напряжением до 1000 в. «Электрические станции», 1964, № 9.
3. Пястолов А. А., К определению напряжения сушки трансформаторов, «Электричество», 1956, № 11.
4. Пястолов А. А. и Попов Е. П., Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с алюминиевыми обмотками, «Электрические станции», 1963, № 4.
5. Bisson A. J., Rochak E. A., Iron conduit impedance effects in ground circuit systems, AIEE Trans., pt II (Applications and Industry), vol. 73, July 1954.
6. Gienger J. A., Davidson O. C., Brendel R. W., Determination of ground-fault current on common A—C grounded-neutral systems in standard steel or aluminum conduit (Applications and Industry), May 1960, № 48.
7. Жуков А. А. и Калинин В. И., К вопросу о токах замыкания на землю в проводниках с оболочками из ферромагнитного материала, Информационный сборник, серия II, «Монтаж промышленного электрооборудования и автоматики», БТИ Госмонтажспецстроя СССР, 1963, № 1.
8. Сневаков П. И., Выбор сечения нулевых проводов в четырехпроводных сетях, «Промышленная энергетика», 1961, № 3.
9. Эббин Л. Е. и Левин Н. Г., Влияние заземлений нулевого провода на величину тока при однофазных коротких замыканиях, Научные труды по электрификации сельского хозяйства, 1958, т. III.
10. Сневаков П. И., Выбор стальных полос в качестве проводников зануления, «Промышленная энергетика», 1963, № 1.
11. Нейман Л. Р., Поверхностный эффект в ферромагнитных телах, Госэнергоиздат, 1949.

[26.10.1964]



Влияние индуктивности и потерь в стали на погрешности при измерении $\operatorname{tg} \delta$ и C_x изоляции обмоток трансформаторов

Инж. М. В. ЛОКШИН

ОРГРЭС

Измерение $\operatorname{tg} \delta$ изоляции обмоток силовых трансформаторов без соблюдения правил, указанных в инструкции по их испытанию (объединение вводов всех трех фаз или фазы и нулевого ввода контролируемой обмотки для трехфазных и однофазных трансформаторов соответственно, а также замыкание накоротко вторичных обмоток), может привести к серьезным ошибкам в оценке ее состояния. При неправильной методике измерений полученные значения могут существенно превышать действительные. Наблюдались ошибки, в результате которых полученные значения $\operatorname{tg} \delta$ превышали действительные в несколько десятков раз.

Теоретические и экспериментальные исследования вопроса показали, что причиной больших погрешностей в измерении $\operatorname{tg} \delta$ изоляции обмоток трансформаторов (особенно мощных трехфазных единиц) является влияние их индуктивности и потерь холостого хода.

Обмотка каждой фазы трансформатора с некоторыми допущениями может быть представлена в виде однородной линии с потерями (рис. 1). Так как процесс рассматривается для частоты 50 Гц, продольными емкостями и проводимостями по изоляции можно пренебречь. Если принять длину всей линии за единицу, а L_0 , r_0 , C_0 и g_0 считать параметрами линии на участке dx , то $L_0 = L dx$, $r_0 = r dx$, $C_0 = C dx$ и $g_0 = g dx$,

где L — индуктивность намагничивания фазы трансформатора;

C — расчетная емкость главной изоляции одной фазы;

r — сопротивление, обусловленное потерями холостого хода;

g — проводимость, обусловленная диэлектрическими потерями в главной изоляции фазы.

При этом предполагается, что

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \frac{g_0}{\omega C_0} = \frac{g}{\omega C} = \operatorname{tg} \delta$$

— действительное значение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции обмотки.

Поскольку для решения поставленной задачи необходимо определить не распределение напряжения и тока по длине линии, а лишь их отношение в начале и конце линии, то принятые условия можно считать достаточно строгими.

Учитывая, что, как правило,

$$r \leq \frac{1}{3} \omega L,$$

а $g \ll \omega C$,
характеристическое сопротивление линии

$$|Z| = \sqrt{\frac{L dx}{C dx}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0.$$

Измеренное значение $\operatorname{tg} \delta$ и C_x может быть получено из выражений для модуля и аргумента входного сопротивления линии:

$$Z_{вх} = \frac{\dot{U}_1}{I_1},$$

где \dot{U}_1 и I_1 — напряжение и ток в начале линии.

Их значения могут быть легко найдены из решений дифференциальных уравнений для установившегося режима линии. Представляют интерес решения задачи в основном для случая, когда измерительный провод C_x подключается к вводу только одной фазы, а две другие свободны. Имеется в виду, что остальные обмотки только заземлены в одной точке, но не замкнуты накоротко. Вначале целесообразно найти выражения для измеренных $\operatorname{tg} \delta$ и C_x , а затем уже решить вопрос о величинах индуктивности, которые могут иметь место в этих схемах.

Рассмотрим рис. 2. Схема дается для простоты и наглядности в виде отрезков линий, причем подразумевается, что линия, соответствующая каждой фазе, имеет схему замещения, показанную на рис. 1, а параметры фаз A и C одинаковы. Схему можно представить таким образом, что к концу линии, соответствующей фазе B , подключается нагрузка в виде двух параллельных линий фаз A и C .

Для такой схемы

$$\begin{aligned} Z_{вх} &= Z_1 \frac{\frac{0,5 Z_2}{\operatorname{th} \gamma_2} + Z_1 \operatorname{th} \gamma_1}{\frac{0,5 Z_2}{\operatorname{th} \gamma_2} \operatorname{th} \gamma_1 + Z_1} = \\ &= Z_1 \frac{0,5 \frac{Z_2}{Z_1} + \operatorname{th} \gamma_1 \operatorname{th} \gamma_2}{0,5 \frac{Z_2}{Z_1} \operatorname{th} \gamma_1 + \operatorname{th} \gamma_2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Ввиду того, что для трехфазных трехстержневых трансформаторов

$$\operatorname{th} \gamma_1 \approx \operatorname{th} \gamma_2, \text{ а } Z_1 \approx Z_2,$$

с некоторыми несущественными допущениями можно считать, что

$$\begin{aligned} Z_{вх} &= \frac{Z_1}{1,5 \operatorname{th} \gamma_1} (0,5 + \operatorname{th}^2 \gamma_1) = \\ &= \frac{Z}{1,5 \operatorname{th} \gamma} (0,5 + \operatorname{th}^2 \gamma) = \frac{Z}{3 \operatorname{th} \gamma} (1 + 2 \operatorname{th}^2 \gamma), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{откуда } Y_{вх} = \frac{3 \operatorname{th} \gamma}{Z (1 + 2 \operatorname{th}^2 \gamma)}, \quad (3)$$

где

$$Z = Z_0 e^{-j \arctg \frac{r - g Z_0^2}{2 \omega C Z_0^2}},$$

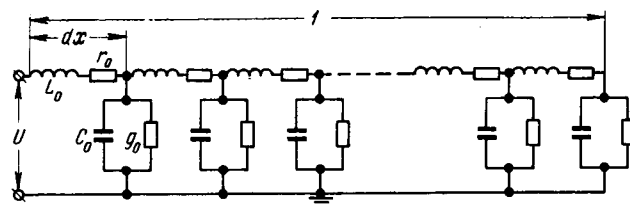


Рис. 1. Схема замещения обмотки фазы трансформатора.

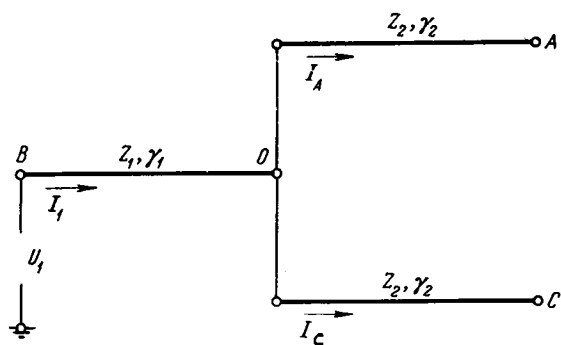


Рис. 2. Измерение $\operatorname{tg} \delta$ и C_x со стороны фазы B . Две другие фазы свободны.

$$\begin{aligned} \operatorname{th} \gamma &= Ae^{j \arctg \frac{\sin 2\omega CZ_0}{\frac{r}{Z_0} + gZ_0}} = \\ &= Ae^{j \left[\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\frac{r}{Z_0} + gZ_0}{\sin 2\omega CZ_0} \right]}. \end{aligned}$$

После некоторых преобразований выражения (3), рассматривая отдельно аргумент и модуль $Y_{\text{вх}}$, получаем:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} = \frac{2A^2 \sin \varphi + \operatorname{tg} \delta}{1 - 2A^2 \cos \varphi}; \quad (4)$$

$$C_{\text{изм}} = \frac{4,8 \sin \delta_{\text{изм}} \cdot 10^{-3}}{Z_0 A \sin \varphi}, \quad (5)$$

где

$$\varphi = \arctg \frac{\frac{r}{Z_0} - gZ_0}{2\omega CZ_0} + \arctg \frac{\operatorname{sh} \left(\frac{r}{Z_0} + gZ_0 \right)}{\sin 2\omega CZ_0}; \quad (6)$$

$$A = \frac{\sqrt{\operatorname{sh}^2 \left(\frac{r}{Z_0} + gZ_0 \right) + \sin^2 2\omega CZ_0}}{\operatorname{ch} \left(\frac{r}{Z_0} + gZ_0 \right) + \cos 2\omega CZ_0}; \quad (7)$$

$C = \frac{C_x}{3}$ — расчетная емкость обмотки одной фазы

трансформатора; $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$, где L — индуктивность обмотки одной фазы, определяемая из опыта; r — сопротивление, вносимое потерями холостого хода в обмотку одной фазы, определяемое из опыта.

Точное решение задачи может быть получено лишь при подстановке соответствующих параметров в выражения (4) и (5). К сожалению, эти выражения достаточно сложны для проведения анализа возможных ошибок в измерениях. Однако во многих случаях они могут быть существенно упрощены. Это имеет место для трансформаторов, у которых $L \leq 200 \text{ гн}$, $r \leq 30 \cdot 10^8 \text{ ом}$, а $C \leq 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ ф}$.

Как показывают измерения, проведенные на трехфазных трансформаторах большой мощности, эти условия в большинстве случаев удовлетворяются.

Следует учесть, что измерение параметров L и r для схемы на рис. 2 должно производиться при токах $I_1 \approx 0,83 I_x$, где I_x значение, имеющее место при измерении $\operatorname{tg} \delta$. В зависимости от схемы измерений необходимо пользоваться параметрами, соответствующими данной схеме.

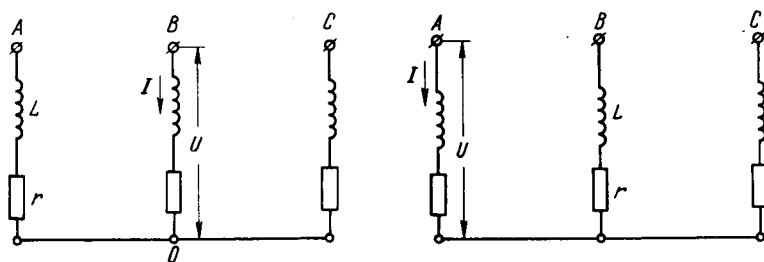


Рис. 3. Измерение L и r обмотки средней фазы. Вторичные обмотки разомкнуты.

Рис. 4. Измерение L и r обмотки крайней фазы. Вторичные обмотки разомкнуты.

В случае, если измерение проводится по схеме на рис. 2, необходимо знать индуктивность и вносимое активное сопротивление средней фазы, а если измерение проводится со стороны одной из крайних фаз, то должна быть найдена индуктивность и вносимое активное сопротивление крайней фазы. Соответствующие значения L и r могут быть получены при измерении по схемам, показанным на рис. 3 и 4.

Определив I_1 и P , получаем:

$$L \approx 0,9 \frac{U_1}{\omega I_1};$$

$$r \approx \frac{P}{I_1^2}.$$

При измерении $\operatorname{tg} \delta$ и C_x по схемам на рис. 5—7 токи в обмотках направлены в одну сторону; поэтому потоки намагничивания будут значительно меньше, чем при измерениях по схеме на рис. 2.

Как показывает анализ, даже при достаточно большой асимметрии емкостных токов в фазах для схем на рис. 5 и 6 индуктивность обмоток каждой из фаз на порядок меньше индуктивности, имеющей место при измерении по схеме на рис. 2, а вносимое активное сопротивление — на два порядка меньше.

Схема измерений, приведенная на рис. 7, позволяет полностью избавиться от потоков намагничивания, так как их компенсация происходит в каждой фазе. Остаются только потоки рассеяния Φ_0 , которые настолько малы, что ими можно пренебречь.

В тех же случаях, когда замкнута накоротко хотя бы одна из вторичных обмоток, потоки намагничивания при всех указанных схемах измерения становятся настолько малы, что практически L и r не влияют на процесс измерения $\operatorname{tg} \delta$ и C_x .

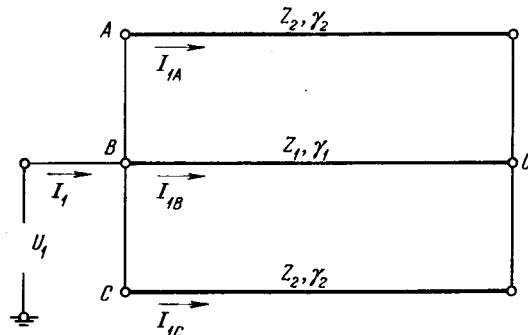
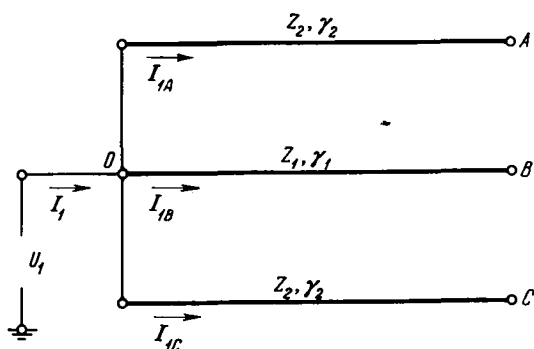
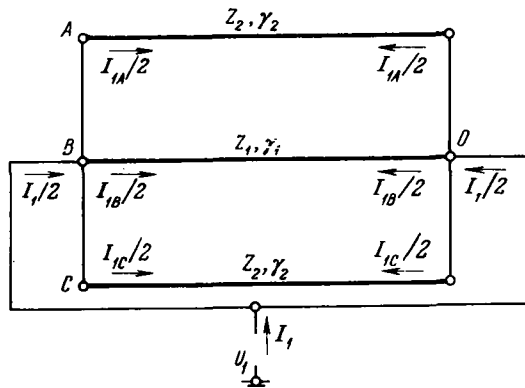


Рис. 5. Измерение $\operatorname{tg} \delta$ и C_x со стороны объединенных вводов всех трех фаз трансформатора.

Рис. 6. Измерение $\operatorname{tg} \delta$ и C_x со стороны нулевого ввода трансформатора.Рис. 7. Измерение $\operatorname{tg} \delta$ и C_x при объединении вводов всех трех фаз с нулевым выводом.

При соблюдении ограничений, наложенных выше на величины L , r и C ,

$$\operatorname{sh} \left(\frac{r}{Z_0} + gZ_0 \right) \ll \sin 2\omega CZ_0;$$

$$\operatorname{ch} \left(\frac{r}{Z_0} + gZ_0 \right) \approx 1;$$

$$\sin 2\omega CZ_0 \approx 2\omega CZ_0;$$

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \frac{r}{\omega CZ_0^2};$$

$$A = \frac{\sin 2\omega CZ_0}{1 + \cos 2\omega CZ_0} = \operatorname{tg} \omega CZ_0 \approx \omega CZ_0.$$

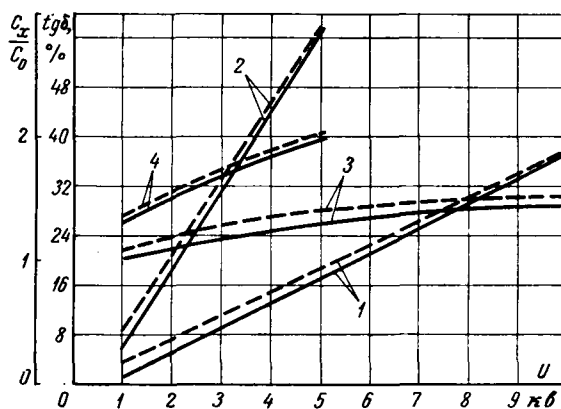
При этих условиях для схемы на рис. 2

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} \approx \frac{2r\omega C + \operatorname{tg} \delta}{1 - 2\omega^2 C^2 Z_0^2} = \frac{2r\omega C + \operatorname{tg} \delta}{1 - 2\omega^2 LC}; \quad (8)$$

$$C_{x \text{ изм}} = \frac{C_x}{1 - 2\omega^2 LC}. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) видно, что при измерении C_x и $\operatorname{tg} \delta$ по схеме на рис. 2 можно получить серьезные погрешности, которые могут привести к неправильной оценке состояния изоляции трансформатора.

Ввиду того, что измерения проводятся при достаточно малых токах I_x (до 300 мА), процесс намагничивания идет в области начальной части кривой намагничивания, причем очень часто он попадает на ее нижний изгиб. В этих условиях возможна зависимость $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}}$ и $C_{x \text{ изм}}$ от величины приложенного напряжения.

Рис. 8. Зависимости $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} = f(U)$ и $\frac{C_x}{C_0} = f(U)$.

1) $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}}$, фазы А и С; 2) $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}}$, фаза В; 3) C_x/C_0 , фазы А и С; 4) C_x/C_0 , фаза В.

— по результатам измерений, — — — — — расчетные.

На изгибе имеет место нелинейная зависимость между током и напряжением (или между B и H):

$$I = aU^k. \quad (10)$$

Отсюда

$$\omega L = a_1 U^{1-k};$$

$$r = a_2 U^{2(1-k)},$$

где $k < 1$.

Используя эти соотношения для (8) и (9), можно получить:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} = \frac{2a_2 \omega C U^{2(1-k)} + \operatorname{tg} \delta}{1 - 2a_1 \omega C U^{1-k}}; \quad (11)$$

$$C_{x \text{ изм}} = \frac{C_x}{1 - 2a_1 \omega C U^{1-k}}, \quad (12)$$

где a_1 и a_2 — коэффициенты пропорциональности.

На рис. 8 показаны зависимости

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} = f(U) \text{ и } \frac{C_{x \text{ изм}}}{C_0} = f(U),$$

полученные при измерениях по схеме на рис. 2 и расчетным путем из выражений (11) и (12) для средней и крайних фаз обмоток 220 кВ трехфазного трансформатора мощностью 360 МВА.

Параметры, необходимые для расчета, были следующие: $a_{1B} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ Ом/В}^{0,4}$; $a_{1A} = a_{1C} = 1,2 \times 10^3 \text{ Ом/В}^{0,38}$; $a_{2B} = 34 \text{ Ом/В}^{0,8}$; $a_{2A} = a_{2C} = 23 \text{ Ом/В}^{0,76}$; $C \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ ф}$; $\operatorname{tg} \delta = 0,3\%$; $k_B \approx 0,6$; $k_C = k_A \approx 0,62$.

Совпадение расчетных кривых и построенных по результатам измерений оказалось достаточно близким.

Выводы. В случае, если измерение $\operatorname{tg} \delta$ и C_x изоляции трансформаторов производится только со стороны одной фазы без замыкания накоротко второй обмотки, могут возникать большие погрешности в результатах измерений из-за влияния индуктивности обмоток и потерь холостого хода. При этом в некоторых случаях возможна достаточно сильная зависимость $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}}$ и $C_{x \text{ изм}}$ от величины испытательного напряжения.

Новые правила защиты подземных сооружений от коррозии

Кандидат техн. наук Д. Б. ЛОМАЗОВ

Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта

В 1965 г. изданы новые правила [Л. 1] защиты подземных сооружений от коррозии, которые заменили аналогичные правила, принятые в 1958 г. К сожалению, в новых Правилах не была в полной мере учтена критика старых Правил, вследствие чего они не всегда соответствуют современным требованиям науки и техники. В данной статье предпринята попытка анализа новых правил.

Из содержания § 2 следует, что Правила не распространяются на линии трамвая, железных дорог и метрополитенов, находящиеся в нормальной эксплуатации. Между тем в § 31, 57, 83 приведены указания о контроле состояния эксплуатируемых рельсовых сетей. Здесь, видимо, редакционная неувязка.

Как указано в примечании к § 2, Правила не распространяются на железобетонные и чугунные конструкции. Такое ограничение содержания этих Правил нецелесообразно по следующим соображениям.

Наиболее острым и болезненным в эксплуатации электрифицированного транспорта в городах и на магистральных железных дорогах в настоящее время является вопрос о коррозии железобетонных опор. Из проверенных на 16 железных дорогах СССР 87 тысяч опор 6 тысяч оказались дефектными. Имеют место случаи поломки опор с весьма тяжелыми последствиями. Эксплуатация железобетонных опор ведется на низком техническом уровне, электрические методы испытаний не усовершенствованы, а состояние подземной части определяется при помощи раскопок.

На железнодорожных станциях и в городах эксплуатируется большое количество чугунных труб, проложенных в земле и нуждающихся в защите от коррозии.

Дорогами и ценными сооружениями являются металлические и железобетонные мосты, на которых уложены электрифицированные пути. Протяженность электрифицированных железных дорог СССР больше, чем во Франции, США, Японии, Великобритании и ФРГ, взятых вместе. Поэтому вопросы защиты этих сооружений в наших условиях должны привлекать к себе гораздо большее внимание и не могут выпасть из содержания этих Правил. Это тем более непонятно, что, как указано на титульном листе, Правила составлялись при участии сотрудников научно-исследовательского института бетона и железобетона (ЦНИИЖБ).

Параграфы 5 и 7 правильно указывают, что меры по ограничению блуждающих токов и защите подземных сооружений должны осуществляться до ввода в эксплуатацию электрифицированного рельсового транспорта и подземных сооружений. Однако второй абзац § 5 разрешает выполнение этих требований осуществлять через год после сдачи сооружения в эксплуатацию и, таким образом, сводит на нет оба параграфа, потому что после сдачи объекта в эксплуатацию дальнейшее проектирование и строительство встречает порой большие препятствия.

Уровень науки в этой области и оснащение ла-

бораторий проектных институтов уже таковы, что позволяют осуществить проектирование и необходимые эксперименты заблаговременно. Этот вопрос был лучше сформулирован в § 10 старых Правил [Л. 2].

Параграф 10 рассматриваемых Правил [Л. 1], указывающий на то, что необходимо вести статистику и анализ коррозионных повреждений, желательно дополнить следующим разделом о том, что подземные сооружения, прослужившие более 30 лет, должны быть взяты на особый учет. За безаварийную эксплуатацию таких сооружений эксплуатационный персонал должен получать премии из фонда амортизационных отчислений.

В новых Правилах недостаточно четко сформулированы § 14 и 15. Проблема рельсового стыка лучше всего решается применением бесстыкового пути. Следует поэтому четко указать на необходимость введения в план ежегодных работ производства сплошной сварки стыков.

Требование § 14 о постановке рельсовых стыков на графитовую мазь не учитывает опыт ее эксплуатации. Такая мазь обладает очень плохими токопроводящими свойствами [Л. 3]. Как показали наши измерения на Приднепровской и Южной железных дорогах, сопротивления стыков с графитовой смазкой после 1—2-летней эксплуатации перестали удовлетворять нормам. Что касается требования приварки к рельсам соединителей сечением 70 мм², то в связи с тем, что в современных рельсовых цепях протекают токи, равные примерно 2 и 3 ка, сечение соединителей (установленное в одной из первых редакций Правил более 50 лет тому назад) следует считать недостаточным.

К тому же следует учесть, что в течение года обрываются 15—20% [Л. 3] соединителей, а в зимнее время их приварка недопустима. Вместо этого в условиях открытого пути электрифицированных железных дорог следует рекомендовать нормальное содержание комплекта деталей рельсового стыка: накладок, пружинящих шайб, болтов и гаек и более строгий контроль за натяжением стыковых болтов. Как показал опыт эксплуатации, это дает хорошие результаты не только по условиям токопроводимости рельсового стыка, но и по условиям безопасности движения поездов [Л. 3].

Уже назрел вопрос о разделении рельсовых стыков на различные категории в зависимости от их расположения в схеме отсасывающей сети. Стыки рельсов у точек отсасывания несут во много раз большую токовую нагрузку, чем стыки, расположенные у точек токораздела. Поэтому для уменьшения блуждающих токов и потерь электрической энергии за ними целесообразно усилить наблюдения.

Сравнивая содержание соответствующих параграфов Правил СН-28-58 и СН-266-63, следует отдать предпочтение старым Правилам, в § 15 которых не содержится указаний о графитовой мази, а говорится о том, что допускаются также другие способы обеспечения электропроводности стыков рельсов при условии, что электрическое сопротивление сты-

ка в эксплуатации не будет превышать сопротивления рельса длиной 3 м.

Параграфы 16 и 74 новых Правил правильно подчеркивают, что неэлектрифицированные пути и тупиковые упоры должны отделяться изолирующими стыками. Третий абзац § 16 вследствие этого следует исключить.

Неточно сформулирован § 18 об учете сопротивления рельсовых стыков. Не учтены сварные стыки и рельсовые звенья длиной 25 м. Неясно сформулирован § 20, посвященный способу соединения различных сооружений с рельсами.

В § 11, 12, 13, 16, 17, 19 правильно рекомендуется возможно лучше изолировать рельсы от земли. Крепление консолей, тяг, оттяжек и фиксаторов железобетонных опор, выпускавшихся до 1962 г., осуществлялось при помощи хомутов, присоединявшихся для безопасности к рельсам. Разрушение защитного слоя бетона, смещение арматурных каркасов или случайные выходы арматурной проволоки на поверхность приводили к контакту между рельсами и арматурой опор и к ее разрушению в анодной зоне рельсов. Чтобы устранить вредное действие токов утечки в заземляющий провод, включают искровой промежуток, пробивающийся в случае повреждения изоляции при разности потенциалов свыше 800 в, после чего возникшее короткое замыкание автоматически отключается.

Проблема безопасной и надежной эксплуатации опор контактной сети решена не лучшим образом. Прежде всего возникает сомнение в том, что существующий способ присоединения арматуры опор к рельсам отвечает требованиям безопасности. Как известно, заземлители должны находиться в непосредственном соприкосновении с землей. Рельсы же электрифицированных железных дорог в соответствии с § 11, 12, 13, 16, 17, 19 по возможности изолируют от земли.

При коротком замыкании в тяговой сети, как показывают расчеты, потенциал рельсов относительно земли превышает 500 в. В связи с этим возникает сомнение в целесообразности использования рельсов электрифицированных железных дорог в качестве заземлителей светофоров, опор и т. п., так как такие «заземлители» являются источником опасного потенциала.

Правила безопасности требуют обеспечивать непрерывность заземляющей цепи, чему противоречит установка искровых промежутков. В связи с этим использование рельсов в качестве заземлителей приводит к мнимой безопасности. Массовое присоединение объектов заземления к рельсам приводит к нарушению их изоляции, увеличению токов утечки и разрушению арматуры опор. Поэтому Правила должны ограничивать распространение таких заземлений.

Параграф 21 новых Правил нужно исключить, так как регламентировать выбор типа фундамента Правилами не нужно.

Параграф 22 нормирует значения токов утечки, определяемых при помощи вспомогательных номограмм, приведенных в приложении 1.

Ограничение токов утечки предусматривалось во всех редакциях Правил.

В Правилах, принятых в 1940 г. [Л. 4], § 38 огра-

ничивал среднюю величину падения напряжения между двумя любыми точками пути до 3 в/км.

Правила 1958 г. [Л. 2] вместо этого ввели ограничение расстояния между тяговыми подстанциями в 35 км на однопутных и 25 км на двухпутных железных дорогах, а в пределах зоны городской застройки — 15 км (§ 25 и 26).

Правила 1940 г. [Л. 4] и 1958 г. [Л. 2] давали, как видно из вышеизложенного, четкие указания для проектирования. Этого нет в рассматриваемых Правилах [Л. 1].

Прежде всего необходимо отметить, что требования § 22 новых Правил могут быть выполнены только в эксплуатации и поэтому они не могут быть учтены при проектировании.

Несмотря на применение весьма громоздкой схемы измерений — 12 счетчиками ампер-часов — результаты измерений ничего определенного не дают. Включать счетчики ампер-часов в дроссельных пунктах каждого пути на расстоянии $\frac{1}{4} - \frac{1}{8}$ длины

перегона нецелесообразно. Для определения максимального тока утечки счетчики нужно было бы включать только в точках, где токи рельсовой цепи минимальны. Такие точки в условиях непрерывного движения поездов, изменяющихся метеорологических условий, непостоянства напряжений тяговых подстанций и т. п. меняют свое месторасположение в широких пределах. В связи с этим эта методика теоретически ошибочна, а практически вредна, так как ориентирует на производство опасных и бесполезных измерений в эксплуатации.

Что касается приведенных в приложении 1 номограмм, то они не имеют теоретических обоснований, так же как и величина нормы утечки, на которой они базируются. Эти номограммы построены для одного значения характеристики утечки 0,31/км, однако нет указаний о том, как ими пользоваться при других метеорологических условиях и поэтому других значениях характеристики утечки, имеющих место во время измерений.

Параграфы 46—51 посвящены рассмотрению вопроса об эквипотенциальности точек отсасывания. Хорошо сформулирован § 50, говорящий о том, что при подключении электродренажных устройств к отрицательной шине тяговой подстанции поддержание эквипотенциального режима отсасывающих пунктов при помощи реостатов необязательно. Опыт работы отсасывающей сети Днепропетровского трамвая на протяжении последних десяти лет, когда подавляющая часть дренажных устройств была подключена к отсасывающим шинам, подтверждает справедливость этой формулировки.

В § 94 сказано, что защиту кабелей с алюминиевыми оболочками можно осуществлять полимерными материалами с дополнительной катодной поляризацией. Этот параграф фиксирует определенные успехи научных исследований в этой области [Л. 5].

Однако в табл. 7 § 96 приведены заниженные величины защитных потенциалов. 15-летний опыт защиты свинцовых оболочек кабелей в условиях г. Днепропетровска выявил возможность длительного приложения отрицательных потенциалов 3÷5 в [Л. 6 и 7]. Ограничение величины дренажных токов, приведенное в § 112, сделано без достаточных

теоретических оснований. Методика измерений сопротивлений железнодорожных рельсовых стыков при помощи двух вольтметров давно устарела и уступает по всем техническим показателям демонстрировавшемуся на Выставке достижений народного хозяйства универсальному стыкомеру, позволяющему осуществлять так же и контроль качества искровых промежутков.

Нормирование падения напряжения в рельсовых цепях, имеющее своей целью ограничение токов утечки и в конечном счете снижение коррозии подземных сооружений, нельзя рассматривать обособленно без учета других влияющих на коррозию факторов. Нормирование падения напряжения, как это сделано в § 45 независимо от наличия подземных сооружений, способов прокладки и т. п., является неточным и частичным решением вопроса, нуждающимся в дальнейших исследованиях и более строгом уточнении температурной зависимости, приведенной в табл. 2 Правил.

Такое нормирование необходимо для обеспечения безопасности работы рельсовых цепей, проложенных в общедоступных местах, и ограничения токов утечки и коррозии.

Требование пп. 9 и 10 приложения 1 о том, чтобы контроль качества контактов отсасывающих пунктов производился вольтметром, внутреннее сопротивление которого должно быть не менее 10 000 ом/в, излишне.

Пункт 13 этого приложения содержит описание несовершенного метода испытания изоляции отсасывающего кабеля и может быть сокращен.

Пункты 14 и 15 приложения 1 посвящены описанию очень громоздких схем и методов измерения разности потенциалов между точками отсасывания, не получивших распространения. В то же время на основании § 50 рассматриваемых Правил от осуществления и эксплуатации таких схем можно воздержаться.

Правила дают определенные указания о полярности контактного провода электрифицированных железных дорог (§ 23) и трамваев (§ 48); этого нет в разделе, касающемся метрополитена.

Известно [Л. 8 и 9], что в условиях трамвая и электрифицированных железных дорог, где применяется электрическая дренажная защита подземных металлических сооружений, целесообразна положительная полярность контактного провода. В условиях же метрополитена, где дренажная защита старыми Правилами запрещалась [§ 116, Л. 2], целесообразна положительная полярность ходовых рельсов. В новых Правилах оба вопроса — о полярности рельсов и возможности применения дренажной защиты в условиях метрополитена опущены.

В § 105 новых Правил впервые приводится оценка степени коррозионной опасности в знакопеременных зонах в зависимости от величины коэффициента несимметрии блуждающих токов. Методика расчета этого коэффициента приводится в приложении 4. Этот параграф с приложением полезен и интересен [Л. 10].

Нельзя здесь не остановиться на строках опубликования таких материалов. Правила были утверждены Госстроем СССР 30 декабря 1964 г. со сроком введения с 1 июня 1964 г., подписаны к пе-

чати 12 сентября 1964 г., и первые экземпляры были нами получены в январе 1965 г. От даты утверждения до выхода в свет прошло более года. Такие темпы опубликования директивных материалов приводят к определенным затруднениям в работе межведомственных комиссий при исполкомах, производящих согласование и утверждение проектов.

Выводы. Рассматриваемые Правила СН-266-63 следует дополнить указаниями о защите находящихся в зоне действия электрифицированных железных дорог, железобетонных опор, мостов и чугунных труб, а также тубингов метрополитена.

Необходимо провести научные исследования для установления единых принципов нормирования допускаемых потенциалов рельсов и токов утечки в условиях электрифицированных железных дорог, трамваев и метрополитена.

Нужно ограничить количество присоединений к рельсам арматур опор, светофорных конструкций и т. п. Такое «заземление» приводит к мнимой безопасности, так как потенциалы рельсов в аварийных случаях превышают 500 в.

Параграф 22 Правил СН-266-63 и приложение 1, посвященные методике измерений токов утечки в рельсовых цепях электрифицированных железных дорог, необходимо отменить как неправильные, ориентирующие на производство опасных и бесполезных измерений.

Следует рекомендовать в условиях метрополитена применять положительную полярность ходовых рельсов.

Разрешение проблемы рельсовых стыков требует более широкого применения их сплошной сварки и бесстыкового пути. Необходимо ввести в Правила указание о том, что не менее половины рельсовых стыков должны выполняться сварными.

Необходимо в Правила ввести указание о более широком применении коллекторов на насыщенных подземными сооружениями магистралях.

Литература

1. Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии—СН-266-63, Изд-во литературы по строительству, М., 1964.
2. Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии—СН-28-58, Изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, М., 1958.
3. Ломазов Д. Б., Электрические свойства рельсовых стыков, Труды Днепровского института инженеров транспорта, вып. XXIX, 1959.
4. Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами, Трансжелдориздат, 1948.
5. Викторова Т. В. и Лунев А. Ф., Коррозия алюминиевых сплавов в подземных условиях, «Защита трубопроводов от коррозии», 1962, № 1.
6. Акинфиев Л. И. и Акуленок В. Н., О новых правилах защиты подземных металлических сооружений от коррозии, «Электричество», 1960, № 8.
7. Ломазов Д. Б., К пересмотру «Правил защиты металлических сооружений от коррозии СН-28-58», «Электричество», 1962, № 1.
8. Hampel H., Zur Frage der zweckmäßigsten Polarität der Fahrleitung bei Gleichstrombahnen, «Electric», 1962, № 10.
9. Ломазов Д. Б., О выборе полярности контактного провода метрополитена, «Электричество», 1962, № 4.
10. Толстая М. А., Иоффе Э. Н. и Потеминская И. В., Влияние переменного тока промышленной частоты на электрокоррозию стали, Борьба с коррозией в нефтяной и газовой промышленности, вып. 3, 1963.

[2.3.1965]

Определение потерь энергии при реверсивном потоке мощности

Инж. В. Г. КИТУШИН

Новосибирск

В практике проектирования и эксплуатации электрических систем большое признание нашел приближенный метод определения потерь энергии с использованием величины — времени наибольших потерь мощности

$$\tau = \frac{\int_0^{8760} I^2 dt}{I_M^2}, \quad (1)$$

I — текущее значение тока.

I_M — максимальное значение тока.

Однако этот метод оказывается неприменимым при определении потерь энергии в электрических элементах сети при протекании по ним реверсивного потока мощности. А такая задача стоит очень часто. Например, при определении потерь энергии в трансформаторах связи теплоэлектроцентрали с системой или при определении потерь энергии в линии, связывающей две системы и служащей для передачи в основном мощности, а не энергии.

В настоящей статье рассматривается возможность распространения указанного метода и на те задачи, где требуется определить потери энергии в элементе с реверсивным потоком мощности.

Обычно график реверсивного потока образуется в результате вычитания двух графиков, например генерирующей мощности и нагрузки. Каждый из графиков характеризуется максимальной величиной (I_M , P_M) и своими интегральными характеристиками: числом часов использования максимума мощности T и временем наибольших потерь мощности τ .

Решение поставленной задачи путем построения графика реверсивного потока и определения его интегральных характеристик T и τ является очень сложным и трудоемким процессом.

Другим решением указанной задачи могут служить следующие соображения. Потери электрической энергии в элементе электрической системы за год (аналогично за любой интервал времени) составят:

$$\Delta \mathcal{E} = R \int_0^{8760} (I_1 - I_2)^2 dt, \quad (2)$$

где R — сопротивление элемента;

I_1 — текущее значение тока первого графика, например нагрузки;

I_2 — текущее значение тока второго графика, например мощности станций.

Выражение (2) можно переписать так:

$$\Delta \mathcal{E} = R \left[\int_0^{8760} I_1^2 dt + \int_0^{8760} I_2^2 dt - 2 \int_0^{8760} I_1 I_2 dt \right],$$

но

$$\int_0^{8760} I^2 dt = I_M^2 \frac{\int_0^{8760} I^2 dt}{I_M^2} = I_M^2 \tau,$$

где I_M — максимальное значение тока;

$$\Delta \mathcal{E} = R \left[I_{1M}^2 \tau_1 + I_{2M}^2 \tau_2 - 2 \int_0^{8760} I_1 I_2 dt \right]. \quad (3)$$

Если один из токов остается неизменным за весь рассматриваемый промежуток времени, например $I_1 = I_{1M} = \text{пост.}$, то

$$\Delta \mathcal{E} = R [I_{1M}^2 \tau_1 + I_{2M}^2 \tau_2 - 2 I_{1M} I_{2M} T_2]. \quad (4)$$

Если представляется возможным разбить рассматриваемый промежуток времени на сумму отрезков, в течение которых можно принять неизменным один из токов, то последний интеграл также раскрывается без особого труда.

Для раскрытия последнего интеграла в общем виде рассмотрим график, состоящий из суммы токов I_1 и I_2 . Потери энергии от такого тока будут:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}' &= R \int_0^{8760} (I_1 + I_2)^2 dt = \\ &= R \left[I_{1M}^2 \tau_1 + I_{2M}^2 \tau_2 + 2 \int_0^{8760} I_1 I_2 dt \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

С другой стороны, эти потери можно найти из выражения

$$\Delta \mathcal{E}' = R k_{од}^2 (I_{1M} + I_{2M})^2 \tau', \quad (6)$$

где $k_{од}$ — коэффициент одновременности, учитывающий совпадение максимумов двух графиков;

τ' — определяется через

$$T' = \frac{I_{1M} T_1 + I_{2M} T_2}{k_{од} (I_{1M} + I_{2M})} \quad (7)$$

по зависимости $\tau = f(T)$ при $\cos \varphi = 1$.

Из выражений (5) и (6) найдем:

$$\begin{aligned} 2 \int_0^{8760} I_1 I_2 dt &= k_{од}^2 (I_{1M} + I_{2M})^2 \tau' - \\ &- I_{1M}^2 \tau_1 - I_{2M}^2 \tau_2. \end{aligned} \quad (8)$$

После подстановки (8) в (3) и ряда преобразований получим:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E} &= R [2 I_{1M}^2 (\tau'_1 - k_{од}^2 \tau') + 2 I_{2M}^2 (\tau'_2 - k_{од}^2 \tau') + \\ &+ (I_{1M} - I_{2M})^2 k_{од}^2 \tau']. \end{aligned} \quad (9)$$

Полные потери энергии найдутся суммированием потерь энергии от активного потока мощности

$$\Delta \mathcal{E}_a = \frac{R}{U^2} [2P_{1M}^2 (\tau_1^a - k_{од}^2 \tau_1'^a) + 2P_{2M}^2 (\tau_2^a - k_{од}^2 \tau_2'^a) + (P_{2M} - P_{1M})^2 k_{од}^2 \tau_1'^a] \quad (10)$$

и от реактивного потока мощности

$$\Delta \mathcal{E}_p = \frac{R}{U^2} [2Q_{1M}^2 (\tau_1^p - k_{од}^2 \tau_1'^p) + 2Q_{2M}^2 (\tau_2^p - k_{од}^2 \tau_2'^p) + (Q_{2M} - Q_{1M})^2 k_{од}^2 \tau_1'^p]; \quad (11)$$

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_a + \Delta \mathcal{E}_p, \quad (12)$$

где τ^a и τ^p определяются графиками активных и реактивных мощностей и находятся через T^a и T^p по зависимости $\tau = f(T)$, соответствующей $\cos \varphi = 1$.

В том случае, когда известен только коэффициент мощности реверсивного потока $\cos \varphi_{\Pi}$, при его постоянстве потери энергии можно определить по формуле

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{R}{U^2 \cos^2 \varphi_{\Pi}} [2P_{1M}^2 (\tau_1 - k_{од}^2 \tau') + 2P_{2M}^2 (\tau_2 - k_{од}^2 \tau') + (P_{2M} - P_{1M})^2 k_{од}^2 \tau']. \quad (13)$$

Вывод. Применение в расчетах рассматриваемых задач выражений (10)–(13) позволяет значительно упростить решение и дает существенную экономию времени по сравнению с методом определения потерь путем построения графиков реверсивного потока и определения его характеристик T и τ .

[3.8.1964]



УДК 621.

Составление схем замещения нулевой последовательности параллельных линий для некоторых особых случаев их включения

Доктор техн. наук А. Б. ЧЕРНИН
Москва

В [Л. 1–3] даны схемы замещения нулевой последовательности параллельных линий с взаимной индукцией между ними для разных случаев их включения.

Ниже составлены схемы замещения нулевой последовательности для параллельных линий при некоторых особых случаях их включения. Необходимость таких решений выявилась на практике при проектировании релейной защиты.

Схемы замещения двух параллельных линий при заземлении одной из них с обоих концов и наличии на второй из них ответвления или петлевого захода на подстанцию. На рис. 1,а показана передача двумя параллельными линиями при замыкании на землю на одной из них, имеющей ответвление к промежуточной подстанции IV, для случая, когда вторая линия заземлена с обоих концов.

Падения напряжения на отдельных участках схемы равны:

$$\dot{U}_I = Z_I \dot{I}_I + Z_{mI} \dot{I}_3 + \dot{U}_{III}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_{II} = Z_{II} \dot{I}_{II} - Z_{mII} \dot{I}_3 + \dot{U}_k; \quad (2)$$

$$\dot{U}_{III} = Z_{III} \dot{I}_{III} + Z_{mIII} \dot{I}_3 + \dot{U}_k; \quad (3)$$

$$0 = (Z'_I + Z_{II} + Z_{III}) \dot{I}_3 + Z_{mI} \dot{I}_I + Z_{mIII} \dot{I}_{III} - Z_{mII} \dot{I}_{II}, \quad (4)$$

где Z и Z_m — собственные и взаимные сопротивления линий.

В целях упрощения примем сопротивления обеих линий в выражениях (1)–(4) равными. Тогда, определив ток \dot{I}_3 из (4) и подставив его значение в (1)–(3), получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_I &= Z_I \dot{I}_I + \frac{Z_{mI}}{Z} (Z_{mII} \dot{I}_{II} - Z_{mI} \dot{I}_I - Z_{mIII} \dot{I}_{III}) + \\ &+ \dot{U}_{III} = \left(Z_I - \frac{Z_{mI}^2}{Z} - \frac{Z_{mI} Z_{mIII}}{Z} - \frac{Z_{mI} Z_{mII}}{Z} \right) \dot{I}_I + \\ &+ \frac{Z_{mI} Z_{mIII}}{Z} (\dot{I}_I - \dot{I}_{III}) + \frac{Z_{mI} Z_{mII}}{Z} (\dot{I}_I + \dot{I}_{II}) + \dot{U}_{III}; \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{II} &= Z_{II} \dot{I}_{II} - \frac{Z_{mII}}{Z} (Z_{mII} \dot{I}_{II} - Z_{mI} \dot{I}_I - Z_{mIII} \dot{I}_{III}) + \\ &+ \dot{U}_k = \left(Z_{II} - \frac{Z_{mII}^2}{Z} - \frac{Z_{mII} Z_{mIII}}{Z} - \frac{Z_{mI} Z_{mII}}{Z} \right) \dot{I}_{II} + \\ &+ \frac{Z_{mII} Z_{mIII}}{Z} (\dot{I}_{II} + \dot{I}_{III}) + \frac{Z_{mI} Z_{mII}}{Z} (\dot{I}_I + \dot{I}_{II}) + \dot{U}_k; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{III} &= Z_{III} \dot{I}_{III} + \frac{Z_{mIII}}{Z} (Z_{mII} \dot{I}_{II} - Z_{mI} \dot{I}_I - Z_{mIII} \dot{I}_{III}) + \\ &+ \dot{U}_k = \left(Z_{III} - \frac{Z_{mIII}^2}{Z} - \frac{Z_{mI} Z_{mIII}}{Z} - \frac{Z_{mII} Z_{mIII}}{Z} \right) \dot{I}_{III} - \\ &- \frac{Z_{mI} Z_{mIII}}{Z} (\dot{I}_I - \dot{I}_{III}) + \frac{Z_{mII} Z_{mIII}}{Z} (\dot{I}_{II} + \dot{I}_{III}) + \dot{U}_k. \quad (7) \end{aligned}$$

Уравнениям (5)–(7) удовлетворяет схема, изображенная на рис. 1,б, в которой обозначено:

$$\left. \begin{aligned} A &= Z_I - \frac{Z_m Z_{mI}}{Z}; & B &= Z_{II} - \frac{Z_m Z_{mII}}{Z}; \\ C &= Z_{III} - \frac{Z_m Z_{mIII}}{Z}; & D &= \frac{Z_{mI} Z_{mIII}}{Z}; \\ E &= \frac{Z_{mI} Z_{mII}}{Z}; & F &= \frac{Z_{mII} Z_{mIII}}{Z}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

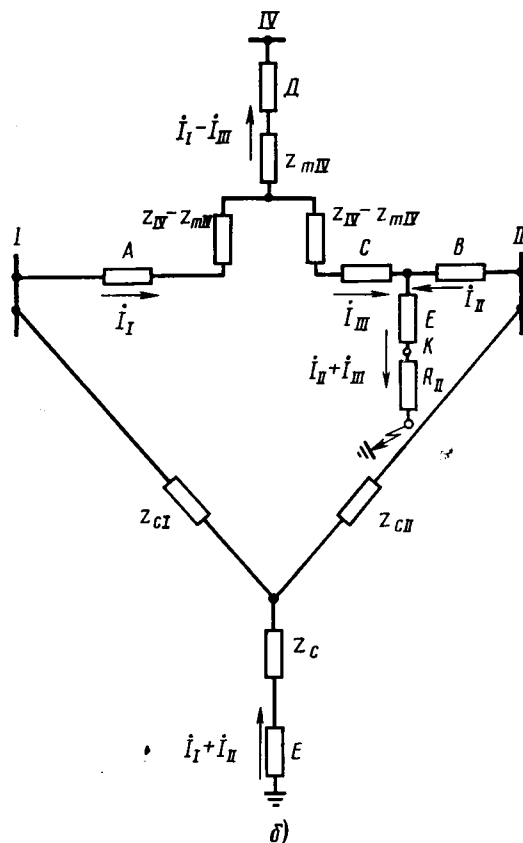
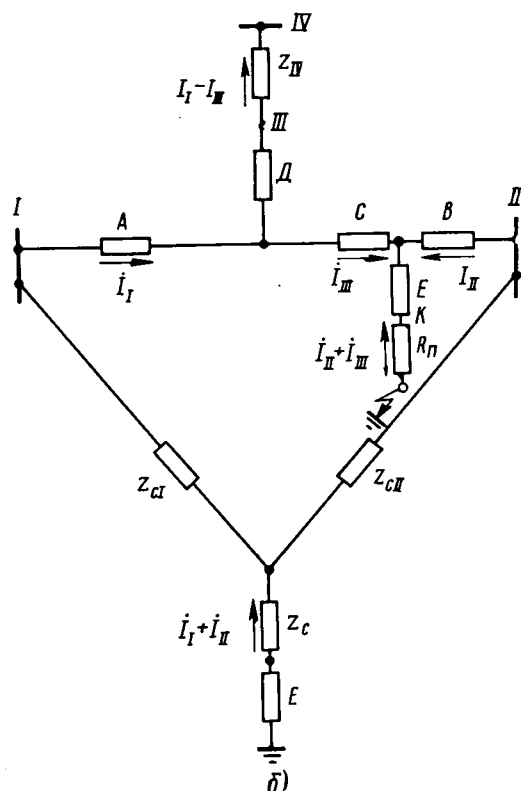
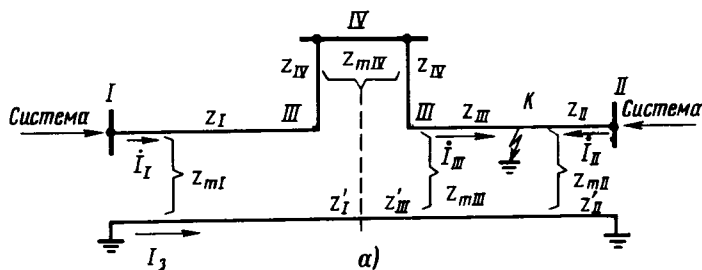
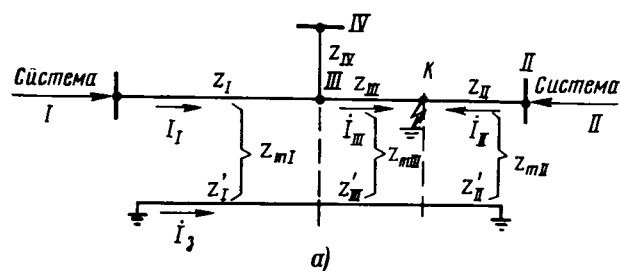


Рис. 1. Исходная схема (а) и схема замещения (б) при замыкании на землю на линии с ответвлением и при заземлении параллельной ей линии.

Рис. 3. Исходная схема (а) и схема замещения (б) при замыкании на землю на линии с петлевым заходом на промежуточную подстанцию и при заземлении линии, параллельной поврежденной.

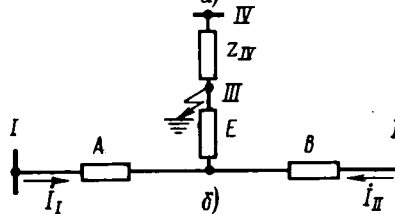
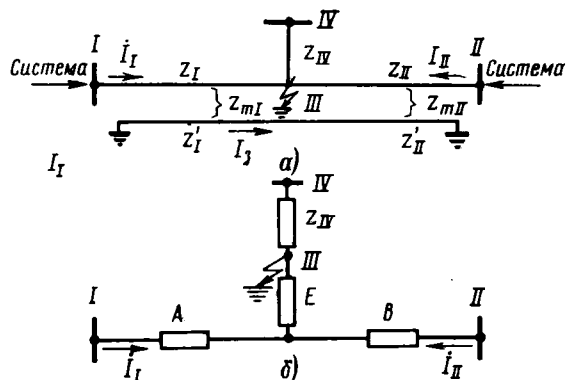


Рис. 2. Исходная схема (а) и схема замещения (б) при замыкании на землю линий с ответвлением при заземлении параллельной ей линии (для случая, когда в схеме рис. 1, а $Z_{III} = Z'_{III} = Z_{TIII} = 0$).

В выражениях (5) — (8) приняты обозначения:

$$\left. \begin{aligned} Z &= Z_I + Z_{II} + Z_{III}; \\ Z_m &= Z_{mI} + Z_{mII} + Z_{mIII}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В схеме 1,б сопротивление E вынесено за нейтральные точки системы, примыкающие к подстанции I и II и представленное эквивалентной «звездой» с сопротивлениями Z_{cI} , Z_{cII} и Z_c , к которой может быть приведена сеть любой сложности при наличии трех опорных точек (I , II и нейтральная точка).

Следует отметить, что при $Z_{III} = Z'_{III} = Z_{TIII} = 0$ (рис. 1,а) схема замещения рис. 1,б совпадает со схемой замещения (рис. 2,б) для случая замыкания на землю в точке III (рис. 2,а). Сопротивления схемы замещения (рис. 2,б) на основании выражения (8) при этом равны:

$$\left. \begin{aligned} A &= Z_I - \frac{Z_m Z_{mI}}{Z}; \\ B &= Z_{II} - \frac{Z_m Z_{mII}}{Z}; \\ E &= \frac{Z_m Z_{mII}}{Z}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Схема замещения на рис. 1,б может быть также использована для случая замыкания на землю на одной из параллельных линий, когда она имеет петлевой заход на промежуточную подстанцию (рис. 3,а). Для этого следует участок параллельных линий III—IV с общей точкой IV, с собственными сопротивлениями Z_{IV} и Z'_{IV} и взаимным сопротивлением Z_{mIV} заменить известной эквивалентной схемой замещения в виде «звезды» (без взаимоиндукции).

Полученная при этом на основании рис. 1,б схема замещения при равенстве сопротивлений обеих линий показана на рис. 3,б, где величины $A \div F$ задаются соотношениями (8) и (9).

Схемы замещения трех параллельных линий при заземлении одной из них с обоих концов. На рис. 4,а показана передача тремя параллельными линиями

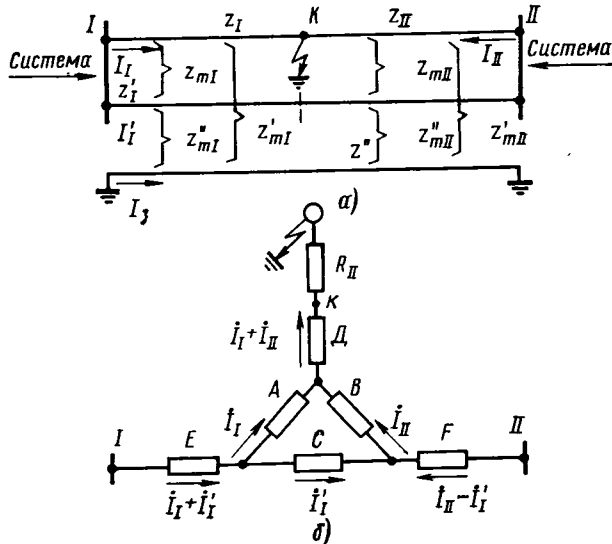


Рис. 4. Исходная схема (а) и схема замещения (б) при замыкании на землю на одной и заземлении другой из трех параллельных линий.

для случая замыкания на землю на одной и заземления с двух концов другой из трех параллельных линий. Падения напряжения на отдельных участках схемы равны:

$$\dot{U}_I = Z_I \dot{I}_I + Z_m \dot{I}'_I + Z_m \dot{I}_3 + \dot{U}_K; \quad (11)$$

$$\dot{U}_{II} = Z_{II} \dot{I}_{II} - Z_{mII} \dot{I}'_I - Z'_{mII} \dot{I}_3 + \dot{U}_K; \quad (12)$$

$$\dot{U}_I - \dot{U}_{II} = Z'_{II} \dot{I}'_I + Z_m \dot{I}_I - Z_{mII} \dot{I}_{II} + Z''_{mII} \dot{I}_3; \quad (13)$$

$$0 = Z''_{II} \dot{I}_3 + Z''_{mII} \dot{I}'_I + Z'_{mII} \dot{I}_I - Z'_{mII} \dot{I}_{II}. \quad (14)$$

Приняв сопротивления отдельных линий равными, определим ток I_3 из (14). Подставив его значение в выражения (11) — (13), получим:

$$\dot{U}_I = (Z_I - Z_{mI}) \dot{I}_I + \frac{Z_m Z_{mII}}{Z} (\dot{I}_I + \dot{I}_{II}) + \left(Z_{mI} - \frac{Z_m Z_{mI}}{Z} \right) (\dot{I}'_I + \dot{I}_I) + \dot{U}_K; \quad (15)$$

$$\dot{U}_{II} = (Z_{II} - Z_{mII}) \dot{I}_{II} + \frac{Z_m Z_{mII}}{Z} (\dot{I}_I + \dot{I}_{II}) + \left(Z_{mII} - \frac{Z_m Z_{mII}}{Z} \right) (\dot{I}_{II} - \dot{I}'_I) + \dot{U}_K; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_I - \dot{U}_{II} &= (Z - Z_m) \dot{I}'_I + \\ &+ \left(Z_{mI} - \frac{Z_m Z_{mI}}{Z} \right) (\dot{I}'_I + \dot{I}_I) + \\ &+ \left(Z_{mII} - \frac{Z_m Z_{mII}}{Z} \right) (\dot{I}'_I - \dot{I}_{II}). \end{aligned} \quad (17)$$

Выражениям (15) — (17) удовлетворяет схема замещения на рис. 4,б, в которой приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A &= Z_I - Z_{mI}; \\ B &= Z_{II} - Z_{mII}; \\ C &= Z - Z_m; \\ D &= \frac{Z_m Z_{mII}}{Z}; \\ E &= Z_{mI} - \frac{Z_m Z_{mI}}{Z}; \\ F &= Z_{mII} - \frac{Z_m Z_{mII}}{Z}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

В выражениях (13) — (18) приняты обозначения:

$$\left. \begin{aligned} Z &= Z_I + Z_{II}; \\ Z_m &= Z_{mI} + Z_{mII}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

При неравных сопротивлениях отдельных линий схема замещения рис. 4,б сохраняется, но величины $A \div F$ по выражениям (18) и (19) имеют более сложный вид.

Вывод. Приведенный метод составления схем замещения параллельных линий, характеризующий тем, что заземленная с двух сторон линия исключается из рассмотрения, обеспечивает максимальную простоту и наглядность и может быть успешно использован для других аналогичных случаев включений параллельных линий, когда часть из них заземлена с двух концов.

Литература

1. Гейнин Н. Г., Эквивалентные схемы замещения нулевой последовательности нескольких близко трассируемых линий, «Электричество», 1960, № 8.
2. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 2. Ступенчатая токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110—220 кВ, Госэнергоиздат, 1961.
3. Ульянов С. А., Электромагнитные переходные процессы в электрических системах, изд-во «Энергия», 1964.

[19.4.1965]



К ВОПРОСУ ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПОЛЬЗОВАНИИ БЫТОВЫМИ ПРИБОРАМИ И АППАРАТАМИ

(Статья М. Р. Найфельда, «Электричество», 1963, № 5)

Инж. М. Д. ГОРЕНШТЕЙН

Новосибирск

Все возрастающий объем жилищного строительства в нашей стране способствует резкому увеличению количества электробытовых приборов, находящихся в обращении. Хотя нет опубликованных данных по несчастным случаям, позволяющих судить о степени опасности разных видов бытового электрооборудования, все же приходится констатировать наличие электротравматизма в быту.

Ведущаясь отдельными энергосбытами разъяснительная работа — выпуск плакатов, беседы по радио (Крымский энергосбыт, Одесса и др.) — безусловно способствует снижению травматизма, но, к сожалению, не может устранить всех несчастных случаев, связанных с технической неисправностью электроприборов.

Широкое применение сборного железобетона в жилищном строительстве, внедрение крупнопанельного домостроения в определенной степени ухудшают условия безопасности в помещениях и особенно в тех, где имеются признаки повышенной опасности (кухни, ванные).

Поэтому постановка М. Р. Найфельдом вопроса о мероприятиях, повышающих безопасность пользования бытовыми электроприборами, является актуальной. Безусловно, настало время, и в стране имеются материальные возможности для улучшения Правил устройства электроустановок в направлении повышения электробезопасности в быту.

Однако при всей важности вопросов безопасности нельзя игнорировать экономическую сторону дела. Нельзя согласиться с выводом М. Р. Найфельда о необходимости перехода на систему заземления всех электроприемников в жилых и общественных зданиях.

Заземление является основным мероприятием по безопасности для аппаратов с металлическими корпусами, однако оно не может обеспечить безопасности при наиболее часто встречающихся повреждениях, не связанных с пробоем на корпус, таких, как, например, оголение токоведущих частей и проводов. Поэтому обеспечение безопасности в быту должно осуществляться двумя путями — улучшением изоляции и заземлением металлических корпусов приборов.

Заземление корпусов приборов. Утверждение М. Р. Найфельда о том, что заземление корпуса прибора может быть причиной поражения электрическим током в помещениях с изолирующими полами, противоречит его же собственным выводам.

Напряжение между заземленным корпусом и связанными с землей элементами здания — полом, трубами отопления и т. д. при соединении корпуса с токоведущими частями всегда будет меньше фазного.

Заземление корпуса увеличивает опасность поражения только для электроплиток с открытой спиралью, когда имеется возможность одновременного прикосновения к заземленному корпусу плитки и к касающейся спирали посуде. Однако и в данном случае наличие изолирующих полов никакого отношения к применению заземления, а тем более к отказу от него, конечно, не имеет: при изолирующих полах ток, протекающий через человека, будет меньше, чем при проводящих полах.

Все нагревательные приборы с закрытой спиралью этого недостатка не имеют.

Таким образом, заземление электроприборов с точки зрения безопасности всегда целесообразно; область применения и степень внедрения заземления корпусов бытовых электроприборов должны определяться экономическими соображениями.

В течение семилетки, как известно, только по линии государственного строительства намечено ввести в эксплуатацию около 15 млн. квартир. До 1980 г. в стране будет построено около 55 млн. квартир.

Естественно, что с учетом уже существующего жилого фонда объем работ по заземлению в квартирах будет довольно значительным и требует максимального упрощения конструкции и эксплуатации заземляющих устройств в бытовых установках, а также определенной очередности по внедрению заземлений в бытовых установках.

Учитывая, что в кухнях жилых зданий условия безопасности значительно благоприятней, чем в производственных помещениях, требования к заземлениям могут быть облегчены по сравнению с промышленными установками.

В целях обеспечения безопасности при максимальной экономии средств и материалов устройства заземления в бытовых установках должны отвечать следующим требованиям:

1. Заземляться должны только бытовые приборы, находящиеся в кухнях и ванных. В жилых комнатах оборудование не заземляется.

2. Заземление корпуса должно выполняться только у электроплиток, духовок, утюгов, стиральных машин, кухонных электрокомбайнов и других бытовых приборов с металлическим корпусом, используемых в основном в кухнях.

3. В каждой кухне должно выполняться повторное заземление нулевого провода путем видимого присоединения его к трубе водопровода. Такая система исключит возможность ошибочного присоединения фазного и нулевого провода на вводных пунктах и групповых щитках.

4. Заземляющий контакт штепсельных розеток на кухне должен присоединяться не к нулевому проводу электропроводки, а к проложенной открыто заземляющей шинке.

5. Заземляющая шинка должна выполняться из стальной оцинкованной проволоки диаметром 3—4 мм, прокладываемой по стене и плинтусу кухни на скобках (аналогично прокладке телефонных кабелей ТРВК), и присоединяться к водопроводной трубе.

Расходы по выполнению заземлений. Всего в среднем на кухню потребуется около 10 м оцинкованной проволоки. Принимая, что через 15 лет общее количество квартир в стране достигнет 75—80 млн., полная потребность в проволоке для заземлений при сплошной электрификации составит 800 тыс. км, или 80 тыс. т при диаметре 4 мм и 45 тыс. т при диаметре 3 мм. Среднегодовой расход проволоки будет соответственно 5 и 3 тыс. т. Расходы на выполнение заземления в одной кухне составят менее 50 коп. за материал, 50—60 коп. за работу и около 2 руб. прочих затрат на розетки, вилки, шнуры и дополнительные контакты электроприборов. Необходимо отметить, что массовое применение вилок и розеток с заземляющими контактами для бытовых приборов, несомненно, приведет к упрощению конструкций и существенному снижению их стоимости. Поскольку в настоящее время стоимость электро-монтажных работ в жилищном строительстве составляет около 3,5% стоимости здания, затраты на заземление не превысят сотые доли процента.

Эксплуатация заземлений. Простота конструкции и высокая надежность заземлений в бытовых установках должны исключать необходимость в привлечении для надзора за ними квалифицированного персонала. Никаких периодических замеров сопротивлений повторных заземлений не потребуются, так как вследствие большого количества параллельных заземлений нулевого провода общее сопротивление всегда будет очень небольшим. Систематическая окраска полов и панелей в кухнях масляной краской обеспечивает защиту заземляющего провода от коррозии и позволяет применять тонкие провода диаметром менее 5 мм. Открытая прокладка заземляющего проводника сведет контроль за заземлением к внешнему осмотру, доступному для каждого жильца.

Улучшение изоляции проводов в бытовых установках. Расследование случаев поражения электрическим током пока-

зывает, что около 50% поражений происходит из-за прикосновения к оголившимся проводам. Поэтому одним из важных мероприятий по повышению безопасности бытовых электроустановок является правильный выбор проводов для переносных бытовых электроприемников.

1. Для электроприемников, используемых на кухнях, где должно быть обеспечено заземление корпусов приборов, необходимо применять провода с наружной изоляционной оболочкой. Наиболее подходящим будет применение проводов ШРПС $3 \times 1 \text{ мм}^2$. Представляется целесообразным расширение номенклатуры проводов ШРПЛ с введением в нее трехжильных проводов сечением $3 \times 1 \text{ мм}^2$.

2. Все переносные токоприемники, применяемые в жилых комнатах, — вентиляторы, пылесосы, ионизаторы, электробритьи, настольные лампы, торшеры и т. д. — должны присоединяться только с помощью двухжильных проводов в общей защитной оболочке, аналогичных проводам ШРПЛ.

3. Двухжильные провода без наружной оболочки типа ШПВ, ШПЛ и аналогичные могут применяться только для бытовых приборов, устанавливаемых в жилых комнатах более или менее стационарно и редко отключаемых — радиоприемники, телевизоры, холодильники и т. д.

Требования к конструкции бытовых приборов. В связи с развитием большой химии уже в ближайшее время можно будет исключить применение металла для корпусов ряда бытовых приборов. Корпуса настольных ламп, бра, вентиляторов, электробритьи, ионизаторов и т. д. должны изготавливаться только из пластмасс. Корпуса холодильников, пылесосов и т. д., выполняемые из листовой стали и не подлежащие заземлению, должны покрываться изоляционной краской или эмалью. Ручки холодильников, пылесосов и других незаземляемых бытовых приборов должны изготавливаться из пластмасс.

Электроплитки как с точки зрения безопасности, так и для улучшения технических показателей должны изготавливаться с закрытым нагревателем и иметь заземление корпуса. До перехода на 100%-ный выпуск таких электроплиток будут выпускаться и плитки с открытой спиралью. Для них заземление корпуса не должно предусматриваться, и они должны выпускаться с обычной двухштырьковой вилкой, пригодной для включения в штепсельную розетку, имеющую заземляющее гнездо.

Конструкция электробритьи позволяет без существенных затрат надежно изолировать вал электродвигателя от металлических режущих частей. Изоляционный корпус бритвы также исключает возможность поражения электрическим током при внутренних повреждениях. Таким образом, и данный вид бытовых приборов может быть выполнен практически абсолютно безопасным.

По ориентировочным подсчетам число электробритьи в стране составит в ближайшее десятилетие более 20 млн. шт. Изготовление для их питания такого же количества разделяющих трансформаторов, как это предлагается М. Р. Найфельдом, представляется экономически и технически неоправданным.

Особо следует остановиться на вопросе выполнения штепсельных розеток в ванных. Одним из доводов специалистов, настаивающих на разрешении выполнения штепсельных розеток в ванных (особенно в гостиницах) является необходимость пользования электробритьями. Но именно благодаря электрической бритве, не требующей для работы воды, исчезает необходимость в пользовании ею в ванной.

Нельзя не учитывать, что при наличии розетки в ванной неизбежно будут включаться электроплитки для нагрева воды и другие приборы, что недопустимо с точки зрения безопасности.

Особо неблагоприятные условия электробезопасности в ванных (повышенная температура, влажный токопроводящий пол, теснота и наличие заземленных элементов) требуют запрещения установки розеток в ванных.

Выводы. 1. Для обеспечения безопасности бытовых электроустановок должно применяться заземление в кухнях и усиление изоляции приборов, используемых в жилых комнатах.

2. Вопреки сложившемуся мнению заземление в кухне требует незначительных материальных и денежных затрат.

3. Заземление бытовых установок должно выполняться в два этапа:

- а) начиная с 1965 г., заземление должно предусматриваться во вновь строящихся жилых домах;
- б) с 1970 г. необходимо приступить к устройству заземлений во всех существующих зданиях.

4. Необходимо разработать провода и установочные изделия, обеспечивающие повышенную безопасность в сочетании с дешевизной и удобствами эксплуатации. В частности, конструкция бытовых штепсельных розеток с заземляющим контактом для кухонь должна допускать включение обычных вилок для присоединения электроплиток с открытой спиралью, а вилка для утюгов должна подходить и к обычным розеткам, устанавливаемым в жилых комнатах, где нет заземления.

5. Необходимо ввести статистику несчастных случаев от электротока, дифференцированную по условиям и причинам поражения, что позволит обоснованно решать вопросы электробезопасности.

УДК 614.8

ОТВЕТ АВТОРА

1. В моей статье вовсе не говорится о заземлении всех электроприемников. Речь идет о переносных и передвижных электроприемниках, а также стационарных (плиты, нагреватели и т. п.).

Нельзя применять заземление только в кухнях и ванных; любой прибор (утюг, пылесос, плитка и др.) может применяться в разных помещениях, его штепсельное присоединение, имеющее заземляющие контакты в штепсельной розетке и вилке, не должно меняться в зависимости от того, в каком помещении электроприемник работает. Можно, разумеется, в штепсельной розетке, находящейся в жилых комнатах, не выполнять соединение заземляющего контакта с нулевым проводом. Но такое решение также вызывает неудобства, так как возможно, например, включить стиральную машину или пылесос в розетку, находящуюся в коридоре, а работать с ними в ванной комнате или кухне. Это тем более возможно, что розетки в ванных комнатах запрещены.

Единое решение всегда способствует уменьшению ошибок. Если допустить разные решения, нет уверенности, что в тех местах, где это необходимо, заземляющий контакт не будет присоединен при монтаже или ремонте.

Что же касается экономии, то отказ от заземления в жилых комнатах, как это следует из сказанного выше, никакой экономии или упрощения не дает.

2. В моей статье указывалось, что заземление бытовых приборов и аппаратов должно сопровождаться рядом мероприятий, в том числе улучшением качества изделий, изоляции проводов и оборудования и т. п. М. Д. Горенштейн подтверждает это положение. Вместе с тем нельзя считать совершенно исключенной возможность случайного одновременного прикосновения к частям, находящимся под напряжением, и к заземляющему корпусу электроприемника или трубам водопровода или отопления. Правда, при хорошем качестве изделий, снятии защиты с нулевого провода и надлежащей эксплуатации такое случается редко. Но не считаться с этим недостатком заземления электроприемников нельзя. Однако преимущества заземления во много раз перекрывают этот недостаток.

М. Д. Горенштейн ошибается, считая, что при изолирующих полах такие случаи менее опасны. Состояние пола при указанных прикосновениях не имеет никакого значения.

Ошибочно также утверждение, что напряжение между корпусом и трубами отопления всегда меньше фазного. При заземленной нейтральной сети оно практически равно фазному, а при изолированной может быть и выше.

3. М. Д. Горенштейн почему-то считает, что заземление бытовых приборов вызовет большое удорожание установок. На самом деле никакого удорожания не будет, не считая, разумеется, улучшения качества изделий и установочных мате-

Профессор Андроник Гевондович ИОСИФЬЯН

(К 60-летию со дня рождения)

21 июля 1965 г. исполнилось 60 лет крупному советскому ученому в области электромеханики и автоматики, доктору технических наук, профессору, академику АН Армянской ССР, Герою Социалистического Труда, лауреату Государственной премии А. Г. Иосифьяну.

А. Г. Иосифьян в 1930 г. окончил Азербайджанский политехнический институт и был направлен на работу во Всесоюзный электротехнический институт. Здесь молодой ученый-коммунист увлеченно отдает все свои силы и знания развитию передовой науки и техники в нашей стране.

Одной из первых серьезных теоретических работ, выполненных А. Г. Иосифьяном, была разработка в 1931—1934 гг. теории комбинированной схемы синхронного управления с коллекторным генератором переменного тока. Она позволила создать управляемую магнитофугальную машину.

А. Г. Иосифьян является изобретателем бесконтактного сельсина. В своих работах А. Г. Иосифьян дал исчерпывающую теорию бесконтактного сельсина и провел его разработку от первоначального лабораторного образца до совершенного прибора массового производства.

Весьма плодотворной является деятельность Андроника Гевондовича в области следящего электропривода. Работа А. Г. Иосифьяна по теории и практике тиратронных схем синхронного вращения (1936 г.) была первой опубликованной в СССР работой по следящим системам с применением тиратронов для управления электромашинами постоянного тока. Эта большая работа легла в основу многих последующих разработок следящих систем для промышленных и других целей.

Серьезным вкладом в теорию электрических машин и автоматического управления явились опубликованные А. Г. Иосифьяном в 1940—1945 гг. работы по общей теории электромашинного усилителя (амплидина) и силовых синхрон-



но-следящих систем. На основе этих работ в 1945 г. им была разработана теория следящей системы с электромашинным усилителем.

За 35 лет научной деятельности А. Г. Иосифьяном опубликовано свыше 60 печатных работ по многим проблемам электромеханики и автоматического управления. Он является автором 24 изобретений.

А. Г. Иосифьян не только выдающийся ученый, блестящий исследователь и экспериментатор, но и талантливый организатор научного коллектива. Он является основателем, бессменным директором и научным руководителем Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института электромеханики.

Под руководством А. Г. Иосифьяна ВНИИЭМ превратился в крупнейший научно-исследовательский центр страны в области электрических машин, аппаратов и систем автоматического управления.

По его инициативе были созданы филиалы Всесоюзного научно-исследова-

тельского института электромеханики в Ленинграде, Томске, Ереване, Фрунзе, Истре и Кудинове.

А. Г. Иосифьян много сил и внимания уделяет подготовке научных кадров. Среди многочисленных учеников А. Г. Иосифьяна имеется большая группа ученых — бывших аспирантов, а ныне кандидатов наук и докторов.

В 1950 г. он был избран вице-президентом Академии наук Армянской ССР. Работая на этом посту до 1955 г., Андроник Гевондович внес большой вклад в развитие электропромышленности в Армянской ССР и подготовку инженерных и научных кадров республики.

А. Г. Иосифьян с 1955 г. является главным редактором журнала «Электротехника».

А. Г. Иосифьян является членом комитета и председателем Научно-технического совета Государственного комитета по электротехнике при Госплане СССР.

В 1961 г. коммунисты московской партийной организации оказали А. Г. Иосифьяну высокое доверие, избрав его делегатом XXII съезда Коммунистической партии Советского Союза.

За выдающиеся заслуги в развитии отечественной электропромышленности и выполнение правительственных заданий А. Г. Иосифьян награжден двумя орденами Ленина, двумя орденами Трудового Красного Знамени и медалями.

За создание средств автоматики в 1949 г. ему присуждена Государственная премия.

А. Г. Иосифьяну присвоено высокое звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и медали «Золотая звезда».

Сердечно поздравляем Андроника Гевондовича Иосифьяна с 60-летием со дня рождения, желаем ему крепкого здоровья, счастья в личной жизни и дальнейших творческих успехов в научной и организаторской деятельности.

Г. В. Алексенко, В. Г. Бирюков, Н. И. Борисянко, В. С. Борушко, Н. Н. Ковалев, М. П. Костенко, Н. А. Оболенский, Г. Н. Петров, А. А. Розанов, И. Т. Скиданенко, П. В. Тимофеев, М. Г. Чиликин, Н. Н. Шереметьевский

риалов. Но это давно пора уже сделать независимо от вопроса о заземлении.

Одно только снятие защиты в нулевом проводе даст при 15 млн. квартир экономии не менее тех же 15 млн. руб., а в проводах никаких изменений в системах с заземленной нейтралью не требуется. Такие усложнения, как прокладка заземляющих шин на кухне вместо прямого зануления электроприемников, совершенно не нужны. Они затрудняют присоединения к розеткам, ненадежны в эксплуатации и ухудшают внешний вид проводов. Ни в одной стране, где применено заземление в быту, такие усложнения не применяются. Отсюда следует, что и расходы на эти усложнения не потребуются.

4. Приборы, подобные электробритвам, заземлять трудно. Учитывая, что ими часто пользуются в ванных комнатах и что шнуры их часто повреждаются, лучшее решение дают раз-

деляющие трансформаторы. Речь идет в основном о гостиницах, а не о жилых домах.

В Москве в одной из строящихся гостиниц такие розетки и трансформаторы запроектированы и заказаны. Мощность их (15 ва) настолько мала, что включение каких-либо других электроприемников вызовет немедленное сгорание предохранителя, входящего в комплект устройства. Они имеют и соответствующие предостерегающие надписи.

В заключение следует отметить, что с переходом на заземление бытовых приборов и аппаратов связаны еще многие практические вопросы, которые нуждаются в обсуждении в соответствующих заинтересованных организациях, на страницах журналов. Предложения и рекомендации должны быть тщательно рассмотрены с участием широкой технической общественности.

М. Р. Найфельд



Профессор Борис Павлович КОЗЫРЕВ

(К 70-летию со дня рождения)

1 августа 1965 г. исполнилось 70 лет со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, лауреата Государственной премии, доктора технических наук, профессора Бориса Павловича Козырева.

В 1918 г. Борис Павлович Козырев окончил физико-математический факультет Петроградского университета и в течение 3 лет преподавал физику в Вологодском педагогическом институте.

С января 1921 г. деятельность Бориса Павловича неразрывно связана с Ленинградским электротехническим институтом им. В. И. Ульянова (Ленина), где он прошел путь от ассистента до профессора — заведующего кафедрой основ электровакуумной техники и научного руководителя проблемной лаборатории радиационной электроники и вакуумной техники.

Борис Павлович Козырев провел ряд важных научных работ по вакуумной технике, оптической электронике и инфракрасной технике.

За совокупность выполненных исследований Б. П. Козыреву в 1938 г. была присвоена ученая степень кандидата технических наук.

В 1950 г. Б. П. Козырев успешно защитил докторскую диссертацию, в которой обобщил результаты многолетних исследований термических методов регистрации предельно малых лучистых потоков.

В этом же году Б. П. Козыреву была присуждена Государственная премия за разработку и внедрение фотоэлектро-



оптического усиления слабых сигналов (ФЭОУ), способствовавшего развитию работ по спектроскопии и инфракрасной технике в Советском Союзе.

Руководимая профессором Б. П. Козыревым Проблемная лаборатория РЭВТ является в Советском Союзе одним из основных центров по разработке термических приемников радиации, которые успешно применяются в спектроскопии, атмосферной оптике, актинометрии, лимнологии и исследовании процессов фотосинтеза.

Н. П. Богородицкий, В. И. Винокуров, Н. П. Ермолин, А. А. Лебедев, А. А. Потсар, А. Н. Теренин, А. В. Фрежке

УДК 621.313

Профессор Ефим Маркович СИНЕЛЬНИКОВ

(К 60-летию со дня рождения)

Ефим Маркович Синельников родился 11 мая 1905 г. в Екатеринославе (ныне Днепрпетровск) в семье служащего.

Еще будучи студентом Харьковского электротехнического института, в 1928 г. он стал работать на Харьковском электромеханическом заводе в должности младшего инженера. По окончании института в 1930 г. был переведен на должность инженера бюро исследований, а в 1932 г. назначен начальником технического отдела по электроприводу.

Производственную деятельность Е. М. Синельников совмещал с работой в Украинском физико-техническом институте.

С 1937 по 1940 г. Ефим Маркович работал в качестве инженера-исследователя на заводе «Вольта», откуда был откомандирован в Москву, в институт экспериментальной медицины.

В 1942 г. призван в ряды Красной Армии и направлен в научно-исследовательский институт связи РККА.

В октябре 1943 г. Е. М. Синельников защитил в Московском энергетическом институте кандидатскую диссертацию, посвященную преобразованию постоянного тока в переменный с помощью ионных приборов.

С 1946 по 1948 г. Е. М. Синельников



работал во Всесоюзном электротехническом институте в должности старшего научного сотрудника, а в октябре 1948 г. был назначен начальником сектора НИИэлектропромышленности.

Борис Павлович Козырев поддерживает тесную связь с крупными научно-исследовательскими учреждениями и заводами страны, являясь в разные периоды консультантом и членом технических и ученых советов в ГОИ им. С. И. Вавилова, ВНИИМ им. Л. И. Менделеева, ГГО им. А. И. Воейкова и в объединениях ЛОМО и «Светлана».

Перу Б. П. Козырева принадлежит около 150 трудов и изобретений.

Педагогическая деятельность Б. П. Козырева широка и многогранна. Многочисленные ученики знают Бориса Павловича как прекрасного лектора, руководителя научных работ студентов, автора руководств и учебных пособий, декана факультета, руководителя большого числа аспирантов.

В течение ряда лет Борис Павлович участвовал также в педагогической работе ЛПИ им. М. И. Калинина и Военно-морской академии им. А. Н. Крылова.

Являясь передовым советским ученым, Борис Павлович принимает активное участие в политической и общественной жизни.

Деятельность Бориса Павловича Козырева как ученого и педагога получила высокую оценку. За многолетнюю и безупречную работу в системе высшего образования он награжден орденами Ленина и Трудового Красного Знамени, медалями и другими наградами.

В 1956 г. Б. П. Козырев был удостоен звания заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

В 1948 г. Ефим Маркович защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию на тему «Влияние высших гармонических магнитного поля на разбег короткозамкнутых асинхронных электродвигателей».

С сентября 1953 г. и до настоящего времени Е. М. Синельников работает в Новочеркасском политехническом институте. В настоящее время он заведует кафедрой электрических машин, аппаратов, математических счетно-решающих приборов и устройств.

За время работы в Новочеркасском политехническом институте по инициативе и под руководством Е. М. Синельникова создана лаборатория вычислительных машин, в которой исследуются вопросы применения вычислительной техники к расчету электромагнитных, механических и тепловых процессов в электрических машинах и аппаратах.

С 1958 г. Е. М. Синельников — ответственный редактор Всесоюзного научно-технического журнала «Электромеханика» из серии Известия высших учебных заведений МВ и ССО СССР.

Ефим Маркович ведет большую работу по подготовке научных кадров, охот-

М. Р. Найфельд. ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ЗАЩИТНЫЕ МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ, изд-во «Энергия», 1965, 288 стр. с чертежами, ц. 94 коп.

Рецензируемая книга является третьим переработанным и дополненным изданием. Прежде чем охарактеризовать достоинства и недостатки книги, сделаем несколько замечаний.

Заземляющее устройство (заземление) является звеном системы электропитания, которое не участвует непосредственно (если исключить систему провод — земля) в передаче электрической энергии в нормальном режиме. На первый взгляд оно представляет очень несложную систему голых металлических проводов и заземлителей, легко поддающихся расчету. В действительности же обоснованный расчет этой системы, пожалуй, более сложен, чем расчет рабочих проводов электросетей в связи с наличием в ней весьма трудно оцениваемой в аварийном режиме величины общего сопротивления цепи через землю.

Обе эти особенности и привели к тому, что в расчетах системы электропитания расчету заземляющей цепи придается меньше внимание, чем расчету рабочих проводов. Основные положения его часто противоречивы, а сам проект заземления часто имеет формальное значение. Особенно велико число противоречий и неясностей в расчетах заземляющих устройств в сетях с напряжением до 1000 в. За истекшие 5 лет после выхода второго издания рецензируемой книги по расчету и устройству заземляющих устройств появился ряд новых рекомендаций, которые нашли отражение в соответствующих разделах вышедших в 1964 г. «Правил устройства электрических установок». Опубликованные у нас и за рубежом результаты отдельных исследований систем заземления, представляющие научно-практический интерес, пока еще мало знакомы широкому кругу инженерной общественности.

Обобщение этого материала в доступной для большого круга электриков форме с одновременным сложением основных понятий о сущности защитных мер представляет несомненный интерес.

Вот почему выпуск третьего издания книги М. Р. Найфельда весьма своевременен. Она состоит из восьми глав, имеющих следующие наименования: I — «Основные понятия»; II — «Заземление»; III — «Защитные меры в сетях различных систем»; IV — «Защитное отключение»; V — «Разделяющие и понижа-

ющие трансформаторы в сетях до 1000 в»; VI — «Особенности выполнения защитных мер в отдельных установках»; VII — «Устройство заземления» и VIII — «Испытание и измерение заземляющих устройств». Список литературы содержит 74 наименования. Перечень наименований глав указывает на большой и исчерпывающий круг тем, которые рассмотрены автором.

По своему характеру книга является монографией. В ней удачно переплетаются оригинальные мысли и идеи автора с общезвестными понятиями. Результаты многолетней эксплуатации заземляющих устройств развиваются на базе исследований заземляющих устройств. Четко определен читатель книги — это инженер-электрик, техник и практик, участвующие в проектировании, монтаже и эксплуатации систем электропитания.

Несомненной заслугой автора является четкий и ясный стиль изложения. В книге нет громоздких математических выражений и в то же время нет и примитивизма. Отметим некоторые безусловно ценные научные положения, развиваемые автором. Прежде всего это серьезное обоснование нормирования заземляющих устройств по величине сопротивления заземления. В нашей и зарубежной литературе появляются высказывания, толкающие на пересмотр этого основного положения. Анализируя существо дела с учетом этих высказываний, автор утверждает на стр. 34: «Значительный опыт, накопленный в результате эксплуатации обычно применяемых заземлений, дал возможность заменить расчеты выбором определенной величины сопротивления заземляющих устройств в сочетании в необходимых случаях с выравниванием потенциалов» и далее: «Это, разумеется, не исключает производства расчетов напряжения прикосновения в тех случаях, когда в этом встречается необходимость». Удачный пример хорошо иллюстрирует приведенное утверждение.

На стр. 119 после объективной оценки разных точек зрения по режимам сетей до 1000 в подводятся итоги многолетней дискуссии. Читаем: «...допустимы обе системы распределения энергии, поскольку какие-либо специальные правила в тех или иных случаях не содержат прямого запрещения». «Дискуссии

по вопросу о режиме нейтрали в сетях 380 и 220 в, если они ведутся с позиций предпочтения во всех случаях одной системы, надо признать бесплодными». С таким заключением вполне можно согласиться.

Всесторонний анализ сетей до 1000 в позволил автору достаточно подробно изложить методику расчета однофазного замыкания с учетом значения сопротивления трансформатора при разных режимах нейтрали.

Очень оживляют изложение многочисленные примеры расчета, устройства и эксплуатации заземляющих устройств, взятые из практики. Пожалуй, все наиболее важные положения в той или иной степени проиллюстрированы.

Большим достоинством является достаточно четко выраженное положение, которое можно сформулировать так: заземление не является единственным средством защиты от поражения людей напряжением, возникающим на металлических частях при повреждении изоляции. Об этом часто забывают, и заземление выполняется там, где его применение ни технически, ни экономически нецелесообразно. Не случайно поэтому в книге целая глава посвящена защитному отключению.

Весьма интересен раздел книги, посвященный применению стальных проводов, используемых для заземляющей проводки. Хотя исследование стальных проводов проводится давно и результаты его описаны в специальной литературе, эти результаты сравнительно мало известны широкому кругу электриков. В книге приведены ценные рекомендации, обуславливающие их применение. Заслуживают внимания таблицы 7-6, 7-7 и 7-8 на стр. 221—223, в которых приводятся значения активных сопротивлений стальных токопроводов на переменном токе, сопоставление сечений часто встречающихся трубопроводов, используемых в качестве зануляющих проводов с сечением медных и стальных проводов.

Текст книги заканчивается рекомендациями, полезными работникам эксплуатации, о методах контроля состояния заземлений и состоянии изоляции.

Перечисленными примерами не исчерпываются достоинства книги. Остановимся на некоторых замечаниях.

но передает свои знания молодежи. За время работы в НПИ им подготовлено 12 кандидатов технических наук.

Е. М. Синельников выполняет много общественных поручений. Он состоит членом нескольких секций и комиссий при МВ и ССО РСФСР и СССР, пред-

седателем электротехнической секции Северо-кавказского совета по координации и планированию научно-исследовательских работ, консультирует ряд промышленных предприятий по различным вопросам.

За большие заслуги в подготовке спе-

циалистов и в развитии науки Ефим Маркович Синельников награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Внимательный и чуткий в отношениях с людьми, Ефим Маркович Синельников пользуется большим авторитетом у научных работников и студентов.

Б. Н. Авилов-Карнаухов, В. И. Батура, Ю. А. Бахвалов, А. Г. Вогуш, И. П. Воляев, А. Ф. Гикис, А. Д. Дроздов, Г. М. Каялов, В. В. Клейменов, Э. В. Колесников, Д. И. Малов и другие.

Первый параграф гл. 1 посвящен понижению опасности, каковую представляет для человека электрический ток, и условиям возникновения этой опасности. Он написан значительно лучше, чем в предыдущем издании, однако и сейчас содержит существенные недочеты. На стр. 40 отмечается, что «Электрический ток воздействует на организм человека двояко: местно с повреждением тканей и рефлекторно через нервную систему», далее в тексте это принципиальное и правильное положение автор не развивает и при оценке опасных значений тока не учитывает. На стр. 35 читаем: «Наиболее опасны напряжения шага при ударе молнии». Допустим, что при ударе молнии напряжение шага равно напряжению шага, возникающему при коротких замыканиях. Почему оно в первом случае окажется более опасным? Это непонятно.

Восьмой параграф гл. 2 начинается так: «При протекании через заземлители больших токов замыкания на землю возможен значительный нагрев грунта в непосредственной близости от них». В отрыве от значения времени протекания тока рассмотрение нагрева почвы бесполезно. Это утверждение, как и весь параграф, по существу относится к системе «провод — земля», которая в данной книге не рассматривается.

Слабо изложен раздел, относящийся к устройству заземлений в условиях плохих проводящих грунтов — стр. 184—189. Рекомендуются для улучшения заземления специальная обработка грунта, стр. 185. Опыт наш и зарубежный показывает, что рекомендации эти не оправданы ни технически, ни экономически.

В расчете однофазной замыкающей цепи через землю не используются дан-

ные, характеризующие величину сопротивления повреждения. Имеются отдельные редакционные неудачи. В тексте при характеристике напряжений до и свыше 1000 в иногда встречаются не употребляемые теперь для этого термины «высокое» и «низкое» напряжение. Перечень неудач можно было бы продолжить, но они не характеризуют книгу в целом.

Издательство «Энергия» сделало хорошее дело, издав книгу М. Р. Найфельда.

Хорошо написанную монографию по заземлению с одобрением встретят широкие круги энергетиков, потому что автор с вниманием отнесся к многочисленным замечаниям по предыдущим изданиям и учел их при переработке.

**Доктор техн. наук,
проф. В. Е. Манойлов**

УДК 621:017.4/019.4(083.9)

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Издательство «Энергия» в 1966 году выпустит в свет следующие книги по электротехнике, энергетике, автоматике, вычислительной и измерительной технике.

1. ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Учебная литература для вузов

- Атабеков Г. И., Купалян С. Д. и Тимофеев А. Б. Теоретические основы электротехники. Ч. 2 и 3. Нелинейные цепи. Электромагнитное поле. Учебник для вузов. Изд. 2-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 30 л., 50 000 экз., 1 руб. 20 коп. в перепл. (III кв.).
- Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для вузов. Л., «Энергия», 45 л., 20 000 экз., 1 р. 78 коп. в перепл. (III кв.).
- Гуторов М. М. Задачник по основам светотехники. Учебник для вузов, М., «Энергия», 11 л., 10 000 экз., 60 к. в перепл. (I кв.).
- Нейман Л. Р. и Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Учебник для вузов, Л., «Энергия», 13 л., 50 000 экз., 1 р. 15 к. в перепл. (II кв.).
- Нейман Л. Р. и Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Учебник для вузов, Л., «Энергия», 13 л., 50 000 экз., 66 к. в перепл. (III кв.).
- Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. Учебник для вузов, М., «Энергия», 15,5 л., 50 000 экз., 70 к. в перепл. (III кв.).
- Привезенцев В. А., Гроднев И. И. и Холодный С. Д. Основы кабельной техники. Учебное пособие для вузов, М., «Энергия», 28 л., 15 000 экз., 1 р. 60 к. в перепл. (III кв.).

Учебная литература для техникумов

- Попов В. С. и Николаев С. А., Электротехника. Изд. 2-е, М., «Энергия», 33 л., 100 000 экз., 1 р. 80 к. в перепл. (II кв.).

Справочная литература

- Правила изготовления взрывозащищенного электрооборудования, Изд. 4-е, переработ., М., «Энергия», 6 л., 20 000 экз., 35 к. (II кв.).
- Сборник действующих правил по технике безопасности в электротехнической, электронной и радиопромышленности, Изд. 2-е, переработ., М., «Энергия», 90 л., 20 000 экз., 4 р. 70 к. в перепл. (II кв.).
- Справочные данные по электрооборудованию, т. 3. Электрические аппараты, М., «Энергия», 30 л., 20 000 экз., 1 р. 70 к. в перепл. (IV кв.).
- Электротермическое оборудование, Справочник, Под общ. ред. А. П. Альтгаузена, М. Я. Смелянского и М. А. Шевцова, М., «Энергия», 55 л., 20 000 экз., 2 р. 95 к. в перепл. (IV кв.).

Научная и производственно-техническая литература Общие вопросы

- Букштейн М. С., Альбом чертежей для детализовок по электротехнике и радиоэлектронике, Изд. 2-е, переработ., М., «Энергия», 100 л., 10 000 экз., 3 р. 75 к. в папке (IV кв.).
- Калахан Д. А., Современный синтез цепей. Пер. с англ., М., «Энергия», 16 л., 6 000 экз., 1 р. 30 к. в перепл. (III кв.).
- Ламмеранер Иржи и Штафль Милош. Вихревые токи, Пер. с чешск., М., «Энергия», 12 л., 8 000 экз., 83 к. (III кв.).
- Ломоносов В. Ю. и Поливанов К. М., Электротехника (Основные понятия). Изд. 10-е, переработ., М., «Энергия», 22 л., 150 000 экз., 1 р. 25 к. в перепл. (III кв.).
- Луи де Пиан, Теория линейных активных цепей. Пер. с англ., М., «Энергия», 24 л., 6 000 экз., 1 р. 81 к. в перепл. (IV кв.).
- Марков Г. Т. и Чаплин А. Ф., Возбуждение электромагнитных волн, М., «Энергия», 22 л., 10 000 экз., 1 р. 25 к. (III кв.).
- Меерович Э. А., Методы релятивистской электродинамики в электротехнике, М., 6, «Энергия», 10 л., 7 000 экз., 50 к. (I кв.).
- Пален К. А., Топологические и матричные методы, Пер. с англ., М., «Энергия», 6 л., 6 000 экз., 42 к. (II кв.).
- Расчет и моделирование электротехнических устройств с учетом поверхностного эффекта, Труды Ленинградского политехнического института, Л., «Энергия», 12 л., 2 000 экз., 75 к. (II кв.).

Электрические машины и трансформаторы

- Алексеев А. Е., Тяговые электрические машины и преобразователи, Л., «Энергия», 27 л., 7 000 экз., 1 р. 55 к. в перепл. (IV кв.).
- Белый В. А. и Рабинович А. А., Асинхронные машины, М., «Энергия», 28 л., 15 000 экз., 1 р. 55 к. в перепл. (III кв.).
- Бергинов А. И., Униполярные электрические машины, М., «Энергия», 15 л., 10 000 экз., 90 к. в перепл. (III кв.).
- Брановский М. А. и Сивков А. П., Балансировка роторов турбогенераторов, М., «Энергия», 7 л., 8 000 экз., 35 к. (I кв.).
- Виноградов Н. В. и Виноградов Ю. Н., Как самому рассчитать электродвигатель, Изд. 2-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 9 л., 25 000 экз., 45 к. (I кв.).

- Жерве Г. К., Расчет асинхронного двигателя при перемотке, Изд. 4-е, Л., «Энергия», 10 л., 20 000 экз., 65 к. в перепл. (II кв.).
- Куцевалов В. М., Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами, М., «Энергия», 16 л., 8 000 экз., 95 к. в перепл. (I кв.).

- Лопухина Е. М., Сомихина Г. С., Асинхронные микромашины с полым ротором, М., «Энергия», 27 л., 6 000 экз., 1 р. 50 к. в перепл. (III кв.).

- Меркин Г. Б., Конденсаторные электродвигатели, Л., «Энергия», 12 л., 5 000 экз., 80 к. в перепл. (II кв.).

- Рабинович И. И. и Шубов И. Г., Проектирование электрических машин постоянного тока, Л., «Энергия», 30 л., 8 000 экз., 1 р. 70 к. в перепл. (IV кв.).

- Технология крупного электромашиностроения. Ч. 2, Гидрогенераторы, Л., «Энергия», 15 л., 3 000 экз., 1 р. в перепл. (II кв.).

- Технология крупного электромашиностроения. Ч. 2, Гидрогенераторы, Л., «Энергия», 15 л., 3 000 экз., 1 р. в перепл. (II кв.).

- Технология крупного электромашиностроения. Ч. 3, Электрические машины до 20 Мвт, Л., «Энергия», 20 л., 5 000 экз., 1 р. 25 к. в перепл. (III кв.).

- Третьяков М. Н., Испытание электродвигателей малой мощности, Изд. 2-е переработ., Л., «Энергия», 9 л., 8 000 экз., 60 к. в перепл. (II кв.).

- Турбогенераторы, расчет и конструкции. Под общ. ред. Н. П. Иванова и Р. А. Лютера, Л., «Энергия», 45 л., 5 000 экз., 2 р. 45 к. в перепл. (IV кв.).

- Штафль Милош, Электродинамические явления в электрических машинах. Пер. с чеш., М., «Энергия», 8 л., 6 000 экз., 55 к. (IV кв.).

- Юдов М. Ф., Вибрация обмоток электрических машин, М., «Энергия», 9 л., 10 000 экз., 45 к. (II кв.).

Серия «Трансформаторы»

- Алексенко Г. В., Параллельная работа трансформаторов и автотрансформаторов. Изд. 2-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 26 л., 15 000 экз., 1 р. 50 к. в перепл. (IV кв.).

- Пучковский В. В., Увлажненная изоляция трансформаторов (серия «Трансформаторы»), М., «Энергия», 6 л., 6 000 экз., 30 к. (I кв.).

- Фарбман С. А. и Бун А. Ю., Ремонт трансформаторов, Изд. 2-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 32 л., 15 000 экз., 1 р. 75 к. в перепл. (I кв.).

Электрические аппараты

Залесский А. М. и Кукеков Г. А., Тепло-вые расчеты электрических аппаратов, Л., «Энергия», 25 л., 5 000 экз., 1 р. 45 к. в перепл. (II кв.).

Иогансон Р. А., Индукторные тормоза, М., «Энергия», 9 л., 10 000 экз., 45 к. (II кв.).
Образцов В. А., Эксплуатация и ремонт низковольтной аппаратуры, Л., «Энергия», 10 л., 10 000 экз., 65 к. в перепл. (III кв.).
Раховский В. И., Теодорович О. К. и Левченко Т. В., Разрывные контакты электрических аппаратов, М., «Энергия», 15 л., 7 000 экз., 90 к. в перепл. (IV кв.).

Серия «Технология электромашиностроения»

Макаров Л. С. и Урецкий И. З., Заливка ротора электродвигателей больших габаритов (серия «Технология электромашиностроения»), М., «Энергия», 6 л., 8 000 экз., 30 к. (III кв.).
Циханович Б. Г. и др., Изготовление и сборка роторной обмотки турбогенераторов (серия «Технология электромашиностроения»), Л., «Энергия», 7 л., 3 000 экз., 35 к. (III кв.).

Электротехнические материалы и кабели

Безносков Б. Л. и др., Автоматизация и механизация производства кабельных изделий, М., «Энергия», 16 л., 8 000 экз., 95 к. в перепл. (III кв.).

Белоруссов Н. И. и Федосеева Е. Г., Производство кабелей и проводов с пластмассовой изоляцией, М., «Энергия», 7 л., 8 000 экз., 35 к. (I кв.).

Вопросы электрической изоляции. Сборник трудов ВЭИ, М., «Энергия», 20 л., 1 000 экз., 1 р. 15 к. в перепл. (I кв.).

Гольдберг А. Л. и др., Монтажные провода для электронной техники, М., «Энергия», 15 л., 15 000 экз., 90 к. в перепл. (I кв.).

Ейльман Л. С., Королев В. И. и Песарский В. М., Проводниковые материалы для кабелей и проводов, М., «Энергия», 9 л., 10 000 экз., 45 к. (I кв.).

Саакян А. Е. и Глушук П. М., Кабельные резинки, М., «Энергия», 20 л., 8 000 экз., 1 р. 15 к. в перепл. (II кв.).

Устин Э. Ф. и Худякова В. А., Измерения характеристик кабельной связи, М., «Энергия», 13 л., 10 000 экз., 80 к. в перепл. (I кв.).

Чудаков П. И., Наложение резиновой изоляции и оболочек на кабельные изделия, М., «Энергия», 7 л., 10 000 экз., 35 к. (I кв.).
Электрическая изоляция. Труды Ленинградского политехнического института, Л., «Энергия», 12 л., 2 000 экз., 95 к. (II кв.).

Преобразовательная техника

Кремневые вентили, Под ред. проф. В. М. Тучкевича, М., «Энергия», 28 л., 12 000 экз., 1 р. 55 к. в перепл. (IV кв.).

Полупроводниковые выпрямительные агрегаты. Под ред. Г. П. Мостковой и А. С. Боголюбовского, М., «Энергия», 24 л., 12 000 экз., 1 р. 35 к. в перепл. (IV кв.).

Силовые полупроводниковые устройства. Труды ВЭИ имени В. И. Ленина, под ред. А. А. Саковича, М., «Энергия», 10 л., 7 000 экз., 65 к. в перепл. (III кв.).

Электропривод

Дунаевский С. Я., Крылов О. А. и Мазия Л. В., Моделирование автоматизированных электроприводов (серия «Электропривод»), М., «Энергия», 17 л., 8 000 экз., 1 р. в перепл. (II кв.).

Крайцберг М. И., Электропривод при автономном источнике энергии (серия «Электропривод»), М., «Энергия», 11 л., 10 000 экз., 55 к. (II кв.).

Сандлер А. С., Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей (серия «Электропривод»), М., «Энергия», 16 л., 8 000 экз., 95 к. в перепл. (I кв.).

Библиотека электротермиста

Донской А. В. и Володин В. В., Улучшение характеристик высокочастотных электротермических установок (Б-ка электротермиста), М., «Энергия», 6 л., 10 000 экз., 30 к. (I кв.).

Марков Н. А. и Чердовских П. П., Распределение электрического тока в ванне дуговой печи (Б-ка электротермиста), М., «Энергия», 6 л., 8 000 экз., 30 к. (II кв.).

Фельдман И. А. и др., Расчет нагревателей электрических печей сопротивления. Изд. 2-е, переработ. и доп. (Б-ка электротермиста), М., «Энергия», 7 л., 10 000 экз., 35 к. (III кв.).

Светотехника и источники света

Гугель Б. М., Люминофоры для электровакуумной промышленности, М., «Энергия», 22 л., 7 000 экз., 1 р. 25 к., в перепл. (IV кв.).

Рохлин Г. Н., Газоразрядные источники света, М., «Энергия», 33 л., 12 000 экз., 1 р. 80 к. в перепл. (I кв.).

Рябов М. С. и Цинерман Л. А., Электрическая часть осветительных установок, М., «Энергия», 20 л., 15 000 экз., 1 р. 15 к. в перепл. (I кв.).

Ульмишек Л. Г., Производство электрических ламп накаливания. Изд. 5-е, переработ., М., «Энергия», 39 к., 7 000 экз., 2 р. 10 к. в перепл. (I кв.).

II. ПО ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Учебная литература для вузов

Казак Н. А., Лазарев С. С. и Лившиц Д. С., Электроснабжение промышленных предприятий. Учебник для вузов, М., «Энергия», 28 л., 15 000 экз., 1 р. 18 к. в перепл. (III кв.).

Учебная литература для техникумов

Мусаэлян Э. С., Наладка электрооборудования электростанций и подстанций. Учебник для техникумов, М., «Энергия», 27 л., 25 000 экз., 1 р. 09 к. в перепл. (IV кв.).

Чернобровов Н. В., Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 3-е переработ., М., «Энергия», 33 л., 25 000 экз., 1 р. 29 к. в перепл. (IV кв.).

Этус Н. Г. и Бердшадский Л. И., Организация и производство электромонтажных работ на электростанциях и подстанциях. Учебник для техникумов, М., «Энергия», 27 л., 12 000 экз., 1 р. 09 к. в перепл. (IV кв.).

Справочная литература

Долин П. А. и Соловьев П. Ф., Техника безопасности. Справочник электромонтера. Вып. 5. Под ред. А. Д. Смирнова, Б. А. Соколова и П. Ф. Соловьева. Изд. 4-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 10 л., 75 000 экз., 53 к. (IV кв.).

Ковман К. Д., Монтаж силового электрооборудования. Справочник электромонтера. Вып. 4. Под ред. А. Д. Смирнова, Б. А. Соколова и П. Ф. Соловьева. Изд. 4-е, доп., М., «Энергия», 20 л., 20 000 экз., 1 р. 20 к. в перепл. (IV кв.).

Справочная книжка энергетика. Под ред. А. Д. Смирнова, М., «Энергия», 20 л., 40 000 экз., 1 р. 20 к. в перепл. (IV кв.).

Справочник по строительству линий электропередачи. Под ред. А. Д. Романова. Изд. 2-е, переработ., М., «Энергия», 30 л., 17 000 экз., 1 р. 70 к. в перепл. (III кв.).

Справочник по электропотреблению. Под ред. Г. П. Минича, М., «Энергия», 29 л., 20 000 экз., 1 р. 70 к. в перепл. (IV кв.).

Справочник по электроустановкам промышленных предприятий. Под общ. ред. И. Е. Боричева, А. И. Даниленко, А. М. Храмушина и Ф. В. Якубовского. Т. 4. Электрические устройства и конструкции, М., «Энергия», 33 л., 25 000 экз., 1 р. 85 к. в перепл. (IV кв.).

Чумаков В. М., Проводки и осветительные электростанции. Справочник электромонтера. Вып. 2. Под общ. ред. А. Д. Смирнова, Б. А. Соколова и П. Ф. Соловьева. Изд. 5-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 15,5 л., 50 000 экз., 95 к. в перепл. (IV кв.).

Научная и производственно-техническая литература
Электрические станции и подстанции

Двоскин Л. И., Схемы и конструкции распределительных устройств, М., «Энергия», 22 л., 10 000 экз., 1 р. 25 к. в перепл. (IV кв.).

Электрические системы

Мельников Н. А., Матричный метод анализа электрических цепей, М., «Энергия», 11 л., 5 000 экз., 70 к. в перепл. (II кв.).

Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях. Под ред. В. А. Веникова. Изд. 2-е, переработ., М., «Энергия», 25 л., 8 000 экз., 1 р. 40 к. в перепл. (IV кв.).

Щедрин Н. Н., Упрощение электрических систем при моделировании, Л., «Энергия», 10 л., 3 000 экз., 65 к. в перепл. (I кв.).

Линии электропередачи и электрические сети

Андреевский В. Н., Временные опоры линий электропередачи, М., «Энергия», 8 л., 10 000 экз., 40 к. (IV кв.).

Андреевский В. Н., Голованов А. Т. и Зелинчук А. С., Эксплуатация воздушных линий электропередачи. Изд. 2-е, переработ., М., «Энергия», 33 л., 10 000 экз., 1 р. 80 к. в перепл. (IV кв.).

Артемов Д. Е., Тиходеев Н. Н. и Шур С. С., Координация изоляции линий электропередачи. Под ред. Н. Н. Щедрина, Л., «Энергия», 14 л., 2 000 экз., 90 к. в перепл. (I кв.).

Гальперин В. В., Линии электропередачи в районах многолетнемерзлых грунтов, Л., «Энергия», 10 л., 2 000 экз., 65 к. в перепл. (IV кв.).

Горфинкель Я. М. и Кастанович М. М., Организация работ по сооружению линий электропередачи, М., «Энергия», 11 л., 8 000 экз., 70 к. в перепл. (III кв.).

Григорьев Ю. Е., Строительство и монтаж линий электропередачи, М., «Энергия», 11 л., 16 000 экз., 70 к. в перепл. (II кв.).

Ермолаева З. Л. и Масанов Н. Ф., Электропроводки в жилых, детских и школьных помещениях, М., «Энергия», 13 л., 15 000 экз., 80 к. в перепл. (II кв.).

Калайдадзе В. Ш., Опоры линий электропередачи из легкого железобетона, М., «Энергия», 5 л., 4 000 экз., 25 к. (III кв.).

Козлов В. А., Электроснабжение городов, Л., «Энергия», 15 л., 5 000 экз., 90 к. в перепл. (II кв.).

Косолапов И. И. и Кроль А. Г., Изготовление железобетонных опор линий электропередачи, Л., «Энергия», 10 л., 3 000 экз., 65 к. в перепл. (IV кв.).

Передача энергии постоянным и переменным током. Известия научно-исследовательского института постоянного тока. Сборник № 12, Л., «Энергия», 15 л., 3 000 экз., 1 р. 20 к. в перепл. (III кв.).

Передача энергии постоянным и переменным током. Известия научно-исследовательского института постоянного тока. Сборник № 13, Л., «Энергия», 15 л., 30 000 экз., 1 р. 20 к. в перепл. (IV кв.).

Прозктор Е. Г., Закрытые кабельные переходы, М., «Энергия», 8 л., 8 000 экз., 40 к. (I кв.).

Совалов С. А., Режимы электропередачи 400—500 кв. ЕЭС, М., «Энергия», 13 л., 8 000 экз., 80 к. в перепл. (IV кв.).

Солдаткина Л. А., Регулирование напряжения в городских электрических сетях, М., «Энергия», 12 л., 10 000 экз., 75 к. в перепл. (III кв.).

Техническая документация на кабельные муфты до 35 кв. Под ред. Е. З. Бранзбург и Г. Е. Хромченко, М., «Энергия», 21 л., 30 000 экз., 1 р. 20 к. в перепл. (IV кв.).

Цапенко Е. Ф., Контроль изоляции в сетях до 1 000 в, М., «Энергия», 11 л., 8 000 экз., 70 к. в перепл. (III кв.).

Автоматика, релейная защита и связь в энергосистемах

Бабаев Н. Т. и Куликов В. В., Радиоперейные линии связи в энергосистемах, М., «Энергия», 11 л., 8 000 экз., 70 к. в перепл. (IV кв.).

Гельфанд Я. С., Голубев М. Л. и Царев М. И., Релейная защита и автоматика на переменном оперативном токе, М., «Энергия», 16 л., 10 000 экз., 95 к. в перепл. (IV кв.).

Микуцкий Г. В., Устройство обработки и присоединения высокочастотных каналов, М., «Энергия», 10 л., 8 000 экз., 50 к. (I кв.).

Техника высоких напряжений

Анастасиев П. И., Зеленецкий М. М. и Фролов Ю. А., Молниезащита зданий и сооружений, М., «Энергия», 5 л., 12 000 экз., 25 к. (II кв.).

Локшин М. В. и Сви П. М., Измерение диэлектрических потерь высоковольтной изоляции, М., «Энергия», 10 л., 5 000 экз., 50 к. (III кв.).

Руководящие указания по защите от перенапряжений электроустановок 3—500 кв. Вып. 1, М., «Энергия», 22 л., 20 000 экз., 1 р. 25 к. в перепл. (IV кв.).

Руководящие указания по защите от перенапряжений электроустановок 3—500 кв. Вып. 2, М., «Энергия», 20 л., 20 000 экз., 1 р. 15 к. в перепл. (IV кв.).

Стефанов К. С., Техника высоких напряжений, Л., «Энергия», 30 л., 10 000 экз., 1 р. 65 к. в перепл. (IV кв.).

Электрооборудование и электроснабжение промпредприятий

Бенерман В. И. и Ловцкий Н. Н., Проектирование силового электрооборудования промышленных предприятий. Изд. 2-е, переработ., Л., «Энергия», 30 л., 12 000 экз., 1 р. 70 к. в перепл. (II кв.).
Каминский Е. А., Техника чтения схем электроустановок, М., «Энергия», 8 л., 150 000 экз., 40 к. (III кв.).
Лигерман И. И., Компоновка электрооборудования промышленных предприятий, М., «Энергия», 8,5 л., 8 000 экз., 43 к. (I кв.).
Надежность электроснабжения. Сборник статей. Под ред. И. А. Сыромятникова, М., «Энергия», 14 л., 7 000 экз., 85 к. в перепл. (II кв.).
Соколов Б. А. и Соловьев П. Ф., Монтаж и эксплуатации электрооборудования. Изд. 6-е, переработ., М., «Энергия», 30 л., 50 000 экз., 1 р. 05 к. в перепл. (IV кв.).

Библиотека электромонтера

Апольцев Ю. А., Эксплуатация синхронных компенсаторов. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 3,5 л., 10 000 экз., 12 к. (II кв.).
Аптов И. С. и Хомяков М. В., Уход за изоляционным маслом. Изд. 2-е, переработ. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 20 000 экз., 16 к. (I кв.).
Барзам А. Б., Как читать схемы релейной защиты электроавтоматики. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4 л., 33 000 экз., 14 к. (I кв.).
Бариев Н. В., Электрооборудование строительных экскаваторов. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 7 л., 20 000 экз., 25 к. (III кв.).
Белов Г. В., Ошиновка распределительных устройств гибкими проводами. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 20 000 экз., 16 к. (II кв.).
Бойко О. А., Наладка коммутации машин постоянного тока. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 2 л., 10 000 экз., 0,7 к. (III кв.).
Быков Е. И., Силовые кремневые выпрямители. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 5 л., 12 000 экз., 18 к. (III кв.).
Вавин В. Н., Трансформаторы тока и их цепи. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 16 000 экз., 16 к. (IV кв.).
Голубев М. Л., Реле прямого действия. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 20 000 экз., 16 к. (II кв.).
Гуревич Г. И., Инструктаж по технике безопасности на рабочем месте электромонтера. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4 л., 20 000 экз., 14 к. (I кв.).
Дементьев В. С., Как определить место повреждения в силовом кабеле. Изд. 2-е, переработ. и доп. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 30 000 экз., 16 к. (II кв.).
Дилух Ю. И. и Куткин А. И., Феррорезонансные стабилизаторы напряжения. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 15 000 экз., 16 к. (IV кв.).
Елфимов В. М., Векторные диаграммы в релейной защите. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4 л., 15 000 экз., 14 к. (III кв.).
Ефремов В. Е., Эксплуатация высококачественных каналов линий электропередачи 6-35 кВ. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 12 000 экз., 16 к. (III кв.).
Зевакин А. И., Комплексные трансформаторные подстанции. (Б-ка электромонтера),

М., «Энергия», 4 л., 20 000 экз., 14 к. (IV кв.).
Зимин Е. Н., Защита асинхронных двигателей до 500 в. Изд. 2-е, переработ. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4 л., 30 000 экз., 14 к. (II кв.).
Ивенский Ю. Н., Новик И. К. и Фуремс А. А., Монтаж электрооборудования на станках и автоматических линиях. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 5 л., 10 000 экз., 18 к. (VI кв.).
Ильинский Н. Ф., Расчет и выбор сопротивлений для электродвигателей. Изд. 2-е переработ. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 16 000 экз., 16 к. (II кв.).
Ильяшов В. П., Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4 л., 16 000 экз., 14 к. (II кв.).
Ковман К. Д. и Ризоватов А. В., Монтаж электродвигателей и вращающихся преобразователей. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 30 000 экз., 16 к. (IV кв.).
Крикун И. В., Испытания заземляющих устройств. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 20 000 экз., 16 к. (IV кв.).
Ларионов В. П., Защита жилых домов и производственных сооружений от молнии. Изд. 2-е, переработ. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 15 000 экз., 16 к. (II кв.).
Левченко М. Т. и Черняев П. Д., Индукционные реле тока. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 17 000 экз., 16 к. (IV кв.).
Лившиц Д. С., Нагрев проводников и защита предохранителями в электросетях до 1000 в. Изд. 2-е, испр. и доп. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 5 л., 20 000 экз., 18 к. (IV кв.).
Маршак Е. Л., Ремонт обмоток электрических машин переменного тока. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 5,5 л., 20 000 экз., 20 к. (II кв.).
Минин Г. П., Мегомметр. Изд. 2-е доп. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 2,5 л., 25 000 экз., 09 к. (III кв.).
Найфельд М. Р., Что такое защитное заземление и как его устраивать. Изд. 2-е, доп. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4,5 л., 35 000 экз., 16 к. (IV кв.).
Овчинников В. В., Реле РНТ в схемах дифференциальных защит. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4 л., 15 000 экз., 14 к. (III кв.).
Ривлин Л. Б., Как определить неисправности асинхронного двигателя. Изд. 3-е, переработ. и доп. (Б-ка электромонтера), Л., «Энергия», 3 л., 30 000 экз., 11 к. (IV кв.).
Фридкин И. А., Эксплуатация распределительных и трансформаторных подстанций. (Б-ка электромонтера), М., «Энергия», 4 л., 20 000 экз., 14 к. (II кв.).

III. АВТОМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Учебная литература для вузов

Егоров К. В., Основы теории автоматического регулирования. Учебник для вузов. Изд. 2-е, переработ., М., «Энергия», 35 л., 25 000 экз., 1 р. 38 к. в перепл. (IV кв.).
Куликовский Л. Ф., Автоматические информационные измерительные приборы. Учебник для вузов, М., «Энергия», 20 л., 15 000 экз., 85 к. в перепл. (IV кв.).

Новицкий П. В. и Новопашенный Г. Н., Электронные измерительные приборы. Учебник для вузов, Л., «Энергия», 18 л., 10 000 экз., 78 к. в перепл. (IV кв.).

Справочная литература

Емельянов А. И. и Капник О. В., Проектирование установок контроля и автоматики тепловых процессов. Справочное пособие, М., «Энергия», 35 л., 5 000 экз., 1 р. 90 к. в перепл. (II кв.).
Электротехнический справочник. Под общ. ред. профессоров МЭИ. Изд. 3-е, переработ. и доп. Т. 3, книга 1, М., «Энергия», 80 л., 50 000 экз., 4 р. 20 к. в перепл. (IV кв.).
Электротехнический справочник. Под общ. ред. профессоров МЭИ. Изд. 3-е, переработ. и доп. Т. 3, книга 2, М., «Энергия», 50 л., 50 000 экз., 2 р. 70 к. в перепл. (IV кв.).
Энциклопедия измерений, контроля и автоматизации (ЭИКА). Вып. 7, М., «Энергия», 10 л., 15 000 экз., 50 к. (II кв.).
Энциклопедия измерений, контроля и автоматизации (ЭИКА). Вып. 8, М., «Энергия», 10 л., 15 000 экз., 50 к. (III кв.).
Энциклопедия измерения, контроля и автоматизации (ЭИКА). Вып. 9, М., «Энергия», 10 л., 15 000 экз., 50 к. (IV кв.).

Научная и производственно-техническая литература Общие вопросы

Гаврилов М. А., Краткая теория релейных устройств, М., «Энергия», 14 л., 15 000 экз., 85 к. в перепл. (IV кв.).
Дружинин Г. В., Надежность устройств автоматики. Изд. 2-е, переработ., М., «Энергия», 25 л., 10 000 экз., 1 р. 40 к. в перепл. (IV кв.).
Модер Д. Н. и Филлипс С. К., Метод сетевого планирования в организации работ (ПЕРТ). Пер. с англ., М., «Энергия», 25 л., 15 000 экз., 1 р. 90 к. в перепл. (IV кв.).
Хэвилленд Р., Инженерная надежность и расчет на долговечность. Пер. с англ., М., «Энергия», 16 л., 10 000 экз., 1 р. 25 к. в перепл. (IV кв.).

Автоматика и телемеханика

Баранчук Е. И. и Коварская Е. Л., Теория и проектирование следящих систем переменного тока, Л., «Энергия», 23 л., 12 000 экз., 1 р. 35 к. в перепл. (II кв.).
Блейз Е. С. и др., Динамика электромагнитных следящих систем. Под ред. Н. М. Якименко, М., «Энергия», 20 л., 15 000 экз., 1 р. 15 к. в перепл. (IV кв.).
Воронов А. А., Основы теории автоматического управления. Т. 2, Импульсные и нелинейные системы регулирования, Л., «Энергия», 20 л., 10 000 экз., 1 р. 20 к. в перепл. (IV кв.).
Иваницкий Г. Р. и др., Автоматический анализ микрообъектов, М., «Энергия», 12 л., 8 000 экз., 75 к. в перепл. (II кв.).
Инууд К. А., Оптимизация устройств автоматики по критерию надежности, Л., «Энергия», 12 л., 10 000 экз., 75 к. в перепл. (I кв.).
Тутевич В. Н., Основы телемеханики, М., «Энергия», 16 л., 10 000 экз., 95 к. в перепл. (IV кв.).
Шастова Г. А., Кодирование и помехоустойчивость передачи телемеханической информации, М., «Энергия», 20 л., 8 000 экз., 1 р. 15 к. в перепл. (IV кв.).

(Продолжение следует)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. И. Борисенко, Г. В. Буткевич, Б. Б. Воронцов, Д. В. Васильев, Н. Г. Дроздов (главный редактор), **Л. А. Дубинский, Л. А. Желудин, А. М. Залесский, А. С. Насаткин, М. П. Костенко, П. И. Кузнецов, В. С. Кулебакин, Л. Г. Мамиконянц, Н. А. Мельников, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, В. А. Самохвалов, В. В. Солодовников, И. А. Сыромятников, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов**

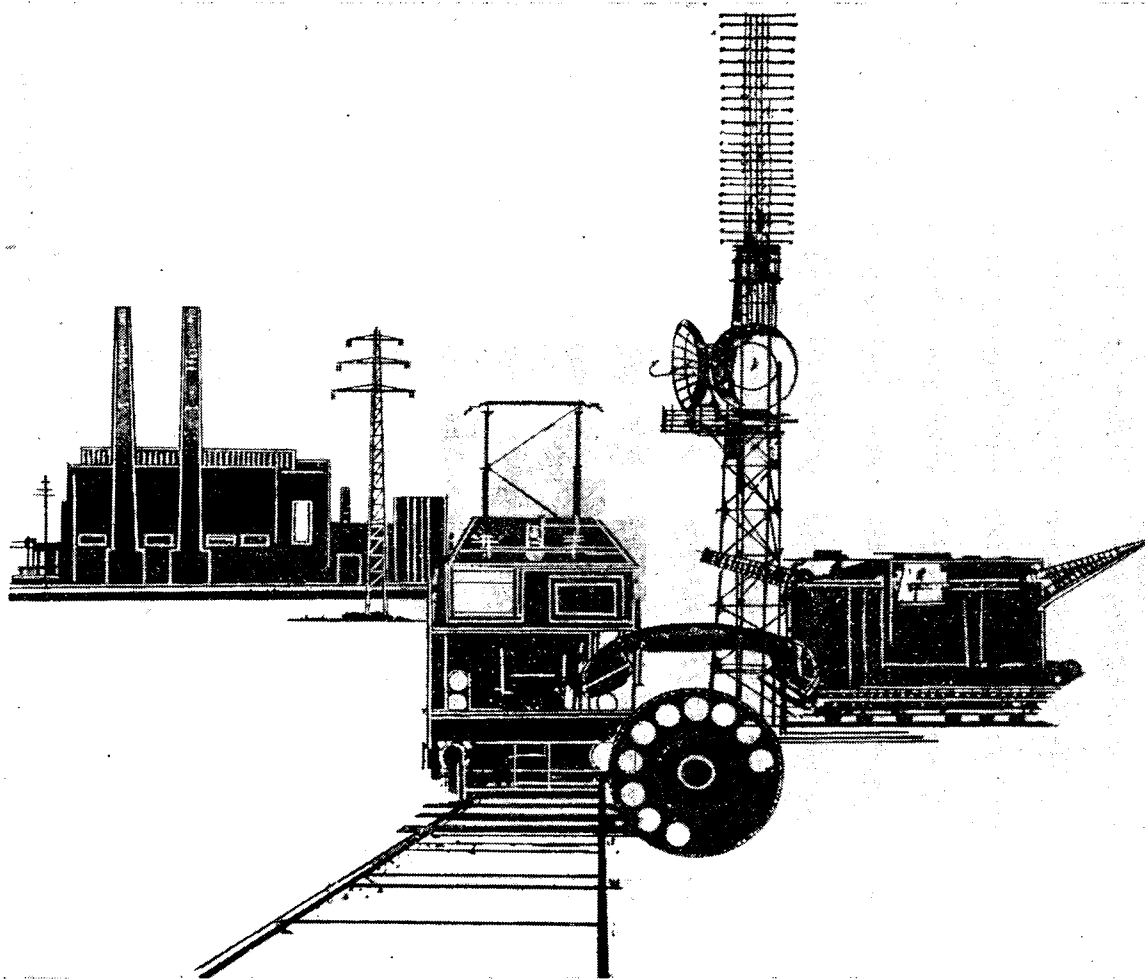
Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2/10. Телефон: К 4-24-80.

Почтовый адрес: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ФИРМА СИМЕНС

**250.000 сотрудников во всем мире.
82 производственных предприятия
в ФРГ и за рубежом.**



Всего лишь два показателя, но они дают уже понятие о величине и значении фирмы. Они свидетельствуют, что фирма Сименс развилась до одной из крупнейших электротехнических фирм в мире. Это развитие определялось интенсивной и глубокой научно-исследовательской работой, проведенной фирмой.

Одной из самых выдающихся особенностей фирмы является ее разнородность. Сименс разрабатывает, проектирует, производит и поставляет электрооборудование для любых целей, начиная с электрического бытового прибора до самых мощных электростанций; с миниатюрного электронного эле-

мента до крупнейшей интерконтинентальной системы связи.

Эта разнородность фирмы Сименс в области электротехники — в пользу заказчика, так как каждая установка, которую мы строим, каждый аппарат, который поставляется нашими заводами, содержат результаты наших научно-исследовательских работ и общий опыт всей нашей фирмы.

Мы приглашаем Вас посетить наш стенд в павильоне Федеративной Республики Германии на международной выставке «Химия в промышленности, строительстве и сельском хозяйстве» с 11 по 26 сентября 1965 года в Москве.



ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ

Проектирование и строительство тепло-атомных и гидроэлектростанций, трансформаторных и преобразовательных станций, распределительных установок и щитов центрального управления;

кабельных и воздушных сетей; защитных устройств для машин, трансформаторов, сетей, а также сигнальных и командных устройств;

устройств для ближнего, автоматического и дистанционного управления, а также для контроля отдельных аппаратов, установок, групп установок, сетей и диспетчерских пунктов;

регулирующих устройств для электрических и неэлектрических величин в системах производства энергии и ее распределения, включая атомные станции.

Консультация при разработке технических и экономических вопросов производства энергии в тепловых, атомных, дизельных и гидроэлектростанциях, передачи и распределения энергии.

Консультация по вопросам паровых котлов.

Автоматизация электростанций.

МЫ ПОСТАВЛЯЕМ:

атомные реакторы;
комплектные паровые и газовые турбинные агрегаты;
гидрогенераторы, дизельгенераторы и генераторы для капсульных агрегатов;

трансформаторы и двигатели;
высоковольтные и низковольтные выключатели и распределительные устройства;

аппараты для регулирования и управления реле;
кабели и провода.

Сименс и Гальске акц. общ.

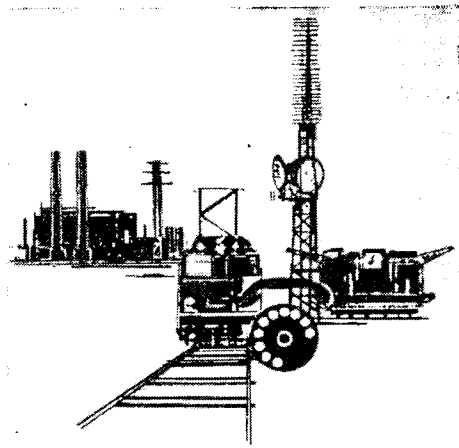
Производственная программа охватывает всю область техники измерения и автоматического регулирования, а также и техники связи;

электрические измерительные приборы и устройства;

измерительные приборы и автоматические регуляторы, установки для контроля, сигнализации, регулирования и управления, установки переработки данных процессов, установки управления теплотехническими и технологическими процессами с вычислительным устройством;

электронные микроскопы, рентгенодифрактометры и рентгеноспектрометры;

приборы и установки для звуковых фильмов, употребляемые в



киностудиях и телевизионных студиях;

телевизионные установки для промышленности;

приборы и установки для техники дальней связи, телеграфной и телефонной техники, а также и техники сигнализации;

слаботочные кабели и провода, электрические детали — конструкции, как электронные лампы, полупроводники и т. д.

Сименс—Шуккертверке акц. общ.

Производственная программа охватывает всю область производства, распределения и применения электроэнергии.

Проектирование и строительство комплексов установок для энергоснабжения.

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ:

для горной, металлургической, химической промышленности; для подъемных установок и средств транспорта; для обрабатывающей промышленности: металлической, лесной, текстильной, пищевой, вкусовой, керамической;

для сварочной техники, теплотехники;

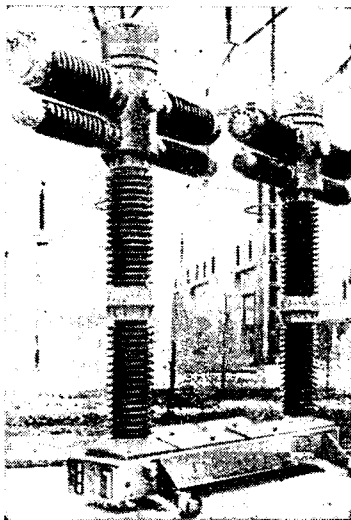
для водного и воздушного хозяйства;

для путей сообщения: ж. д., судостроения, воздушного транспорта.

Электрооборудование для общественных и промышленных зданий.

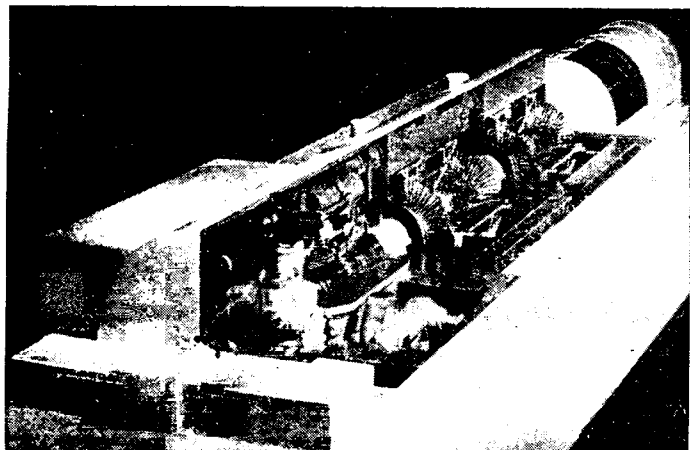
Электротехнические серийные фабрики.

SIEMENS & HALSKEAG
München
SIEMENS & HALSKEAG
Erlangen



Высоковольтный выключатель мощности 220 кВ, дугогашение газом SF₆, разрывная мощность 15 000 МВА.

Преимущества: кратчайшее время гашения, малые габариты, маломощность.



Турбоагрегат 600 МВт, четырехцилиндровый, однофазный, 225 атм, 540° С, перегрев 540° С, генератор 750 МВА с водородным охлаждением (макет).