

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННОГО МОТОР – ВЕНТИЛЯТОРА С ЭКРАНИРОВАННЫМИ КОРОТКОЗАМЫКАЮЩИМИ КОЛЬЦАМИ В ОБМОТКЕ РОТОРА

Захарчук И.А.

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

На новых тепловозах для уменьшения затрат энергии на охлаждение тяговых электрических машин предлагается регулируемый изменением напряжения на обмотке статора осевой вентилятор с встроенным асинхронным электродвигателем обращенной конструкции с экранированными короткозамыкающими кольцами в обмотке ротора (рис. 1). Частота вращения - 3000 об/мин при номинальной частоте питания 100 Гц (число полюсов $2p=4$).

Асинхронный мотор-вентилятор (АМВ) состоит из статора 1 с обмоткой и магнитопроводом, жестко соединенным с основанием 2 при помощи втулки 3, несущей опорные подшипники 4, вала 5, соединенного с ротором при помощи шита 6. Ротор содержит корпус, который состоит из колеса 7, к которому прикрепляются лопасти 8. В колесо 7 запрессован шихтованный пакет ротора 9, в который залита короткозамкнутая обмотка ротора из алюминиевого сплава. Торцевые ферромагнитные кольца 10 из стали Ст.3, охватывают кольца 11 обмотки ротора из алюминиевого сплава, которые замыкают накоротко стержни 12 обмотки ротора из алюминиевого сплава. Кольца 10 служат ферромагнитными экранами для колец 11. Стрелками показано направление охлаждающего воздуха через отверстия в основании 13, в пакете статора 14, в шите 15.

Магнитное поле рассеяния короткозамыкающего кольца 11 обмотки ротора индуцирует вихревые токи в ферромагнитном экране 10 и создает дополнительные потери в экране 10, что увеличивает эквивалентное активное сопротивление ротора.

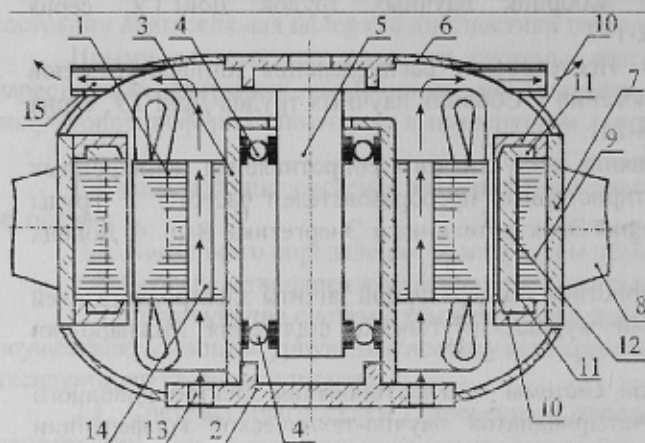


Рисунок 1 – Конструкция однопакетного АМВ с экранированными короткозамыкающими кольцами ротора

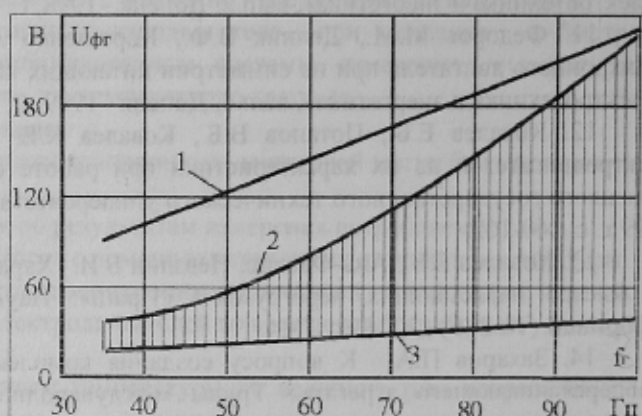


Рисунок 2 – Зависимости фазного напряжения ГЭТ тягового агрегата А721 от частоты тока для тепловоза 2ТЭ116У

Однокорпусные тяговые агрегаты, которые применяются на всех зарубежных тепловозах, и которые планируется устанавливать на новых грузовых тепловозах в Украине, содержат тяговый синхронный генератор (ТГ) и генератор энергоснабжения тепловоза (ГЭТ). ГЭТ в эксплуатации в настоящее время выполняет три основные функции: 1) осуществляет возбуждение ТГ через трехфазный управляемый тиристорный выпрямитель с нулевым выводом, который формирует внешние характеристики ТГ, необходимые для тяговых режимов тепловоза; 2) самовозбуждается при помощи тиристорного выпрямителя с нулевым выводом, который поддерживает фазное напряжение в функции частоты согласно кривой 1 рис. 2 по закону $U_{фг} / U_{фгн} = f_g / f_{гн}$; 3) питает АМВ для охлаждающих устройств тепловоза согласно кривой фазного напряжения 1 рис. 2.

Для питания асинхронных двигателей с вентиляторной нагрузкой АМВ целесообразно поддерживать напряжение на выходе ГЭТ согласно кривой 2 - $U_{фг} / U_{фгн} = (f_g / f_{гн})^2$. При этом АМВ работают с максимальным к.п.д. Определена в [1] кривая 3 – зависимость фазного напряжения на выходе ГЭТ, ниже которой не достаточно возбуждения тяговому генератору ТГ для обеспечения длительных тяговых режимов тепловоза в эксплуатации, причем возбудитель (трехфазный управляемый выпрямитель) ТГ должен быть включен по мостовой схеме. Изменения напряжения между кривыми 2 и 3 на рис. 2 (заштрихованная область) не влияют на тяговые режимы работы тепловоза, следовательно их можно использовать для регулирования частоты вращения АМВ с

экранированными короткозамыкающими кольцами ротора путем изменением напряжения на обмотке статора без силовых электронных преобразователей, что значительно упрощает, удешевляет асинхронный привод вентиляторов на тепловозе, и повышает надежность работы электропривода.

Активное r_2 и индуктивное x_2 сопротивления обмотки ротора АМВ на рис.1, которая представляется в виде многофазной обмотки, число пар полюсов которой равно числу пар полюсов вращающегося поля, создаваемого обмоткой статора, определяются [2]:

$$r_2 = r_c + \frac{r_{кз}}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{z_2}}, \quad x_2 = x_c + \frac{x_{кз}}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{z_2}}, \quad (1)$$

где - r_c и x_c - активное и индуктивное сопротивления стержня 12 (рис. 1) определяются обычным путем [2]; $r_{кз}$ и $x_{кз}$ - активное и индуктивное сопротивления короткозамыкающего кольца 11 с экраном 10; z_2 - число пазов ротора.

Задачей теоретического исследования является определение $r_{кз}$ и $x_{кз}$ для создания методики расчета рабочих, пусковых и регулировочных характеристик асинхронного мотор - вентилятора.

На рис. 3 и 4 приведены расчетная схема для участка короткозамыкающего кольца с ферромагнитным экраном между двумя стержнями обмотки ротора и расчетная модель ферромагнитного экрана.

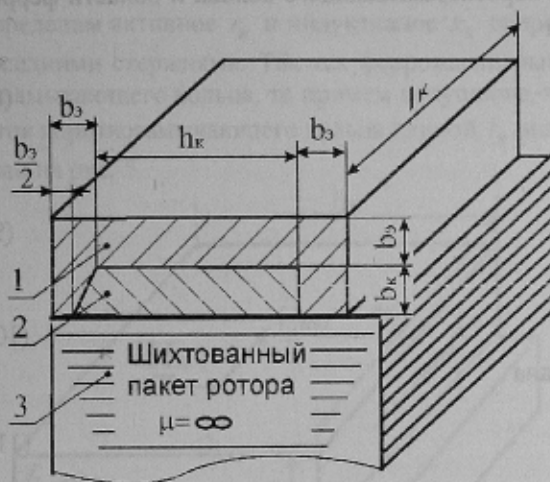


Рисунок 3 – Расчетная схема для участка короткозамыкающего кольца с экраном

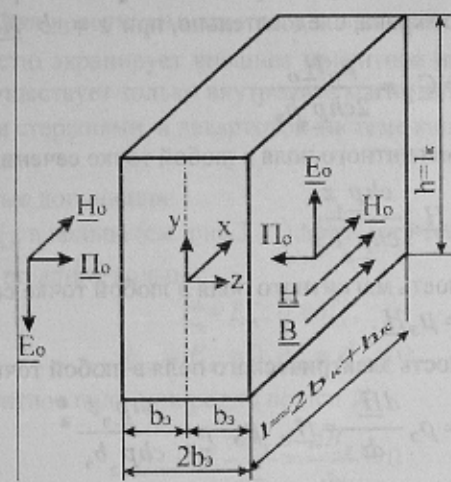


Рисунок 4 – Расчетная модель для участка экрана

Если известен ток I_k в короткозамыкающем кольце 2 (см. рис. 3), то согласно закона полного тока при допущении $h_k \gg b_k$, значение тангенциальной напряженности на поверхности кольца с допущением $\mu = \infty$ для шихтованного пакета:

$$\underline{H}_k = \frac{I_k}{h_k}. \quad (2)$$

Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности раздела короткозамыкающего кольца и ферромагнитного экрана изменяется непрерывно. Следовательно, тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности раздела области короткозамыкающего кольца и области ферромагнитного экрана

$$\underline{H}_o = \underline{H}_k = \frac{I_k}{h_k}. \quad (3)$$

Принятые допущения:

- 1) вектор магнитной индукции \underline{H}_o (см. рис. 4) направлен только по оси x :

$$\underline{H} = \underline{H}_x; \underline{H}_y = \underline{H}_z = 0;$$

- 2) магнитное поле однородно по оси x :

$$\underline{E}_x = 0; \frac{\partial \underline{E}_y}{\partial z} = \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y} = 0;$$

- 3) магнитная проницаемость материала кольца одинакова по всему сечению:

$$\mu_y = \mu_z = \mu_x = const;$$

- 4) все величины, характеризующие электромагнитное поле ($\underline{E}_i, \underline{B}_i, \underline{H}_i$) синусоидальны во времени.

Преобразуем уравнения Максвелла в комплексной форме:

$$\operatorname{rot} \underline{H} = \frac{\underline{E}}{\rho_3}; \quad \operatorname{rot} \underline{E} = -j\omega\mu_3 \underline{H}; \quad (4)$$

где ρ_3 и μ_3 - удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость материала экрана.

С учетом указанных допущений, для плоской волны, получим дифференциальное уравнение распространения электромагнитного поля в ферромагнитном экране:

$$\frac{\partial^2 \underline{H}}{\partial x^2} = \frac{j\omega\mu_3}{\rho_3} \underline{H}. \quad (5)$$

Общее решение уравнения (3.) имеет вид [3]

$$\underline{H} = \underline{C}_1 e^{-\underline{p}_3 z} + \underline{C}_2 e^{\underline{p}_3 z}, \quad (6)$$

$$\underline{p}_3 = \sqrt{\frac{j\omega\mu_3}{2\rho_3}} + j\sqrt{\frac{j\omega\mu_3}{2\rho_3}} = k_3 + jk_3. \quad (7)$$

Постоянные интегрирования \underline{C}_1 и \underline{C}_2 определим из граничных условий, которые определим с учетом принятых допущения. Допускаем, что электромагнитные волны проникают в ферромагнитный экран рис. 4 (толщиной $2b$) с двух сторон на поверхности раздела области короткозамыкающего кольца и области ферромагнитного экрана, следовательно, при $z = \pm b$ $\underline{H} = \underline{H}_{mo}$. Тогда

$$\underline{C}_1 = \underline{C}_2 = \frac{\mu_3 \underline{H}_o}{2 \operatorname{ch} \underline{p}_3 b_3}. \quad (8)$$

Индукция магнитного поля в любой точке сечения экрана

$$\underline{H} = \underline{H}_o \frac{\operatorname{ch} \underline{p}_3 z}{\operatorname{ch} \underline{p}_3 b_3}. \quad (9)$$

Напряженность магнитного поля в любой точке сечения экрана

$$\underline{B} = \mu_3 \underline{H}. \quad (10)$$

Напряженность электрического поля в любой точке сечения экрана

$$\underline{E} = \rho_3 \frac{d\underline{H}}{dz} = \underline{H}_o \cdot \rho_3 \cdot \underline{p}_3 \cdot \frac{\operatorname{sh} \underline{p}_3 z}{\operatorname{ch} \underline{p}_3 b_3}. \quad (11)$$

Комплексная мощность, которая передается магнитным потоком через поверхность от короткозамыкающего кольца к ферромагнитному экрану (см. рис. 3) определится согласно вектора Умова-Пойнтинга [4]:

$$\underline{S}_3 = \frac{1}{2} \underline{E}_{mo} \cdot \underline{H}_{mo}^* \cdot h_k \cdot l_k = P_3 + jQ_3; \quad (12)$$

где $\underline{E}_{mo} = \sqrt{2} \underline{E}_o$ - напряженность электрического поля на поверхности экрана из (12) при $z = b_3$;

$\underline{H}_{mo}^* = \sqrt{2} \underline{H}_o^*$ - сопряженный комплекс вектора напряженности магнитного поля на поверхности экрана из (3) при $z = b_3$; P_3 , Q_3 - активная и реактивная мощности, которые передаются магнитным потоком через поверхность от короткозамыкающего кольца к ферромагнитному экрану.

Подставим (3), (9), (11) в (12), получим с учетом $\underline{E}_{mo} = \sqrt{2} \underline{E}_o$ и $\underline{H}_{mo} = \sqrt{2} \underline{H}_o$:

$$P_3 = I_k^2 \cdot \rho_3 \cdot \frac{l_k}{h_k \cdot l_k} \cdot \lambda_3 \cdot \frac{\operatorname{sh} 2\lambda_3 - \sin 2\lambda_3}{\operatorname{ch} 2\lambda_3 + \cos 2\lambda_3}; \quad Q_3 = I_k^2 \cdot \rho_3 \cdot \frac{l_k}{h_k \cdot l_k} \cdot \lambda_3 \cdot \frac{\operatorname{sh} 2\lambda_3 + \sin 2\lambda_3}{\operatorname{ch} 2\lambda_3 + \cos 2\lambda_3} \quad (13)$$

$$\lambda_3 = \frac{b_3}{\Delta_3}; \quad \Delta_3 = \sqrt{\frac{2\rho_3}{j\omega\mu_3}}; \quad (14)$$

где Δ_3 - глубина проникновения электромагнитной волны в ферромагнитный экран.

Глубина проникновения Δ_3 определяет толщину поверхностного слоя, в котором выделяется 95% всей энергии. На глубине Δ_3 электромагнитная волна практически полностью затухает.

Токи в короткозамыкающем кольце и ферромагнитном экране различны, поэтому их активные и индуктивные сопротивления при определении общего сопротивления кольца с экраном должны быть приведены к одному току. Расчетное активное $r_{кэ}$ сопротивление короткозамыкающего кольца обмотки ротора с экраном получим из условия равенства активных мощностей, выделяемых в сопротивлении $r_{кэ}$ от тока I_k в экранированном короткозамыкающем кольце и отдельно в кольце и в ферромагнитном экране:

$$I_K^2 \cdot r_{KЭ} = I_K^2 \cdot r_K + P_Э, \text{ или } r_{KЭ} = r_K + \rho_Э \cdot \frac{l_K}{h_K \cdot l_K} \cdot \lambda_Э \cdot \frac{sh2\lambda_Э - \sin 2\lambda_Э}{ch2\lambda_Э + \cos 2\lambda_Э}, \quad (15)$$

где r_K - активное сопротивление участка кольца между соседними стержнями; $P_Э$ - активная мощность в экране определяется из (13); $r_Э$ - активное сопротивление экрана определяется из (15).

Расчетное индуктивное $x_{KЭ}$ внутреннее сопротивление короткозамыкающего кольца обмотки ротора с экраном получим аналогично (16) из уравнения:

$$I_K^2 \cdot x_{KЭвнутр} = I_K^2 \cdot x_K + Q_Э, \text{ или } x_{KЭвнутр} = x_K + \rho_Э \cdot \frac{l_K}{h_K \cdot l_K} \cdot \lambda_Э \cdot \frac{sh2\lambda_Э + \sin 2\lambda_Э}{ch2\lambda_Э + \cos 2\lambda_Э}, \quad (16)$$

где x_K - индуктивное сопротивление участка кольца между соседними стержнями; $Q_Э$ - реактивная мощность в экране определяется из (14).

Полное индуктивное сопротивление короткозамыкающего кольца обмотки ротора с экраном

$$x_{KЭ} = x_{KЭвнутр} + x_{KЭвнешн}, \quad (16)$$

где $x_{KЭвнешн}$ - индуктивное сопротивление кольца с экраном от внешних потоков рассеяния, определяется [2]:

$$x_{KЭвнешн} = 9,1 \cdot f \cdot I_K \cdot 10^{-6} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot l_K}{\pi[(h_K + 2b_Э) + (b_K + b_Э)]}. \quad (18)$$

Определим активное r_K и индуктивное x_K сопротивления участка короткозамыкающего кольца между двумя соседними стержнями. Так как ферромагнитный экран полностью экранирует внешнее магнитное поле короткозамыкающего кольца, то примем допущение, что в кольце существует только внутреннее магнитное поле. Участок короткозамыкающего кольца длиной l_K между соседними стержнями в декартовой системе координат показан на рис. 5.

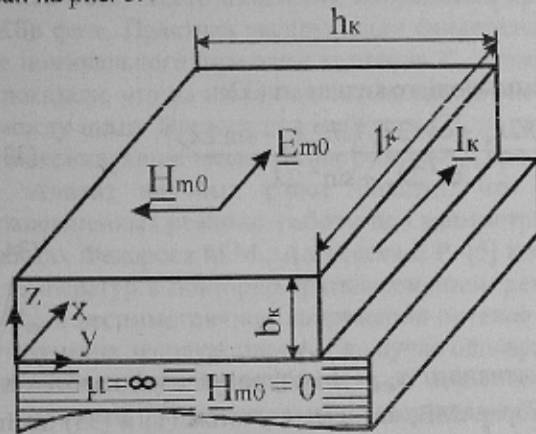


Рисунок 5 Расчетная модель для участка короткозамыкающего кольца обмотки ротора

Принятые допущения:

1) ток I_K в кольце (см. рис.3.11) протекает только по оси x (по длине кольца):

$$\begin{aligned} \underline{E} = \underline{E}_x; \underline{\delta} = \underline{\delta}_x; \\ \underline{E}_y = \underline{E}_z = 0; \underline{\delta}_y = \underline{\delta}_z = 0; \end{aligned} \quad (19)$$

2) магнитное поле однородно по оси X :

$$\underline{B}_x = 0; \frac{\partial \underline{B}_y}{\partial z} = \frac{\partial \underline{B}_z}{\partial y} = 0; \quad (20)$$

3) магнитная проницаемость материала кольца одинакова по всему сечению:

$$\mu_y = \mu_z = \mu_K = const; \quad (21)$$

4) все величины, характеризующие электромагнитное поле ($\underline{E}_i, \underline{B}_i, \underline{H}_i$) синусоидальны во времени.

Преобразуем уравнения Максвелла в комплексной форме:

$$\text{rot} \underline{H} = \frac{\underline{E}}{\rho_K}; \text{rot} \underline{E} = -j\omega \mu_K \underline{H}, \quad (22)$$

где ρ_K и μ_K - удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость материала кольца.

С учетом указанных допущений, для плоской волны, получим дифференциальное уравнение распространения электромагнитного поля в кольце:

$$\frac{\partial^2 \underline{H}}{\partial x^2} = \frac{j\omega \mu_K}{\rho_K} \underline{H}. \quad (23)$$

Решение уравнений (23), зависит от граничных условий, которые определим с учетом допущений:

- 1) магнитная проницаемость шихтованного пакета ротора $\mu = \infty$, следовательно: при $z = 0$ $\underline{H}_m = 0$;
- 2) напряженность магнитного поля на поверхности кольца при $z = b_K$ определяется:

$$\underline{H}_o = \frac{I_K}{h_K}. \quad (24)$$

Решение уравнения (23) имеет вид [3]

$$\underline{H} = C_1 e^{-p_K z} + C_2 e^{p_K z}, \quad (25)$$

$$\underline{p}_k = \sqrt{\frac{\omega \mu_k}{2\rho_k}} (1+j) = k_k (1+j). \quad (26)$$

Из первого и второго граничных условий получим систему уравнений:

$$\underline{C}_1 + \underline{C}_2 = 0, \quad (27)$$

$$\underline{C}_1 e^{-\underline{p}_k b_k} + \underline{C}_2 e^{\underline{p}_k b_k} = -\frac{I_k}{h_k}. \quad (28)$$

Решая совместно уравнения (27) и (28) получим:

$$\underline{C}_1 = -\underline{C}_2 = \frac{I_k}{2h_k \cdot \text{sh} \underline{p}_k b_k}. \quad (29)$$

Напряженности магнитного \underline{H} и \underline{E} электрического полей в любой точке сечения кольца с учетом (25)

$$\underline{H} = -\underline{H}_0 \frac{\text{sh} \underline{p}_k z}{\text{sh} \underline{p}_k b_k} = \frac{I_k}{2h_k} \cdot \frac{\text{sh} \underline{p}_k z}{\text{sh} \underline{p}_k b_k}, \quad \underline{E} = \rho_k \frac{d\underline{H}_m}{dz} = \rho_k \frac{I_k \underline{p}_k}{2h_k} \cdot \frac{\text{ch} \underline{p}_k z}{\text{sh} \underline{p}_k b_k}. \quad (30)$$

Комплексное сопротивление участка кольца между двумя стержнями определим как отношение напряженности электрического поля на поверхности кольца \underline{E}_0 , вычисленное по (31) при $z = b_k$, к величине протекающего тока в кольце I_k и умноженное на длину участка l_k . Получим:

$$\underline{z}_k = r_k + jx_k = \frac{\rho_k l_k}{2h_k} \text{cth} \underline{p}_k b_k = r_{ko} \lambda_k \text{cth} \underline{p}_k b_k. \quad (31)$$

где r_{ko} - сопротивление участка кольца постоянному току

$$r_{ko} = \frac{\rho_k l_k}{b_k h_k}. \quad (32)$$

Активное r_k и индуктивное x_k сопротивления участка короткозамыкающего кольца из (32):

$$r_k = r_{ko} \lambda_k \frac{(\text{ch} 2\lambda_k + \cos 2\lambda_k)(\text{sh} 2\lambda_k + \sin 2\lambda_k)}{\text{sh}^2 2\lambda_k + \sin^2 2\lambda_k}, \quad x_k = r_{ko} \lambda_k \frac{(\text{ch} 2\lambda_k + \cos 2\lambda_k)(\text{sh} 2\lambda_k - \sin 2\lambda_k)}{\text{sh}^2 2\lambda_k + \sin^2 2\lambda_k} \quad (33)$$

$$\lambda_k = \frac{b_k}{\Delta_k}, \quad \Delta_k = \sqrt{\frac{2\rho_k}{\omega \mu_k}}. \quad (34)$$

ВЫВОДЫ

1. Определены расчетные значения активного r_{ko} (15) и индуктивного x_{ko} (16) сопротивлений короткозамыкающих колец с ферромагнитными экранами для обмотки ротора АМВ, которые с учетом (1) и (33) дают возможность рассчитать активное r_2 и индуктивное x_2 сопротивления обмотки ротора.

2. Сопротивления короткозамыкающих колец с ферромагнитными экранами r_{ko} и x_{ko} увеличиваются с увеличением частоты тока в обмотке ротора (14), (15), (16), т.е. с увеличением скольжения ротора, что дает возможность получить благоприятные регулировочные характеристики АМВ при изменении напряжения на обмотке статора.

ЛИТЕРАТУРА

- Захарчук И.А. Анализ работы тягового агрегата в эксплуатационных режимах с синхронными генераторами для тяги и для энергоснабжения тепловоза // Вісн. Схід-ноукр. Нац. ун-ту. — 2007. — №9 (114). — С.112-121.
- Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов. - В 2-х кн.: кн.1 /Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П. и др. /Под ред. И.П. Копылова. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 464 с.
- Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля: Справочн. пособие для электротехн. спец. вузов. - М.: Высш. шк., 1989. - 271 с.
- Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 2. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 426 с.