

Ер.6.7
415

TALLINNA POLITEHNILISE
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 415

Э Л Е К Т Р О М Е Х А Н И К А

У 1

ТАЛЛИН 1977

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
№ 415 1977

УДК 621.3

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

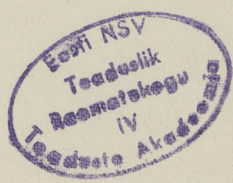
VI

Таллин 1977

1977

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

IV



1977

УДК 621.313.33

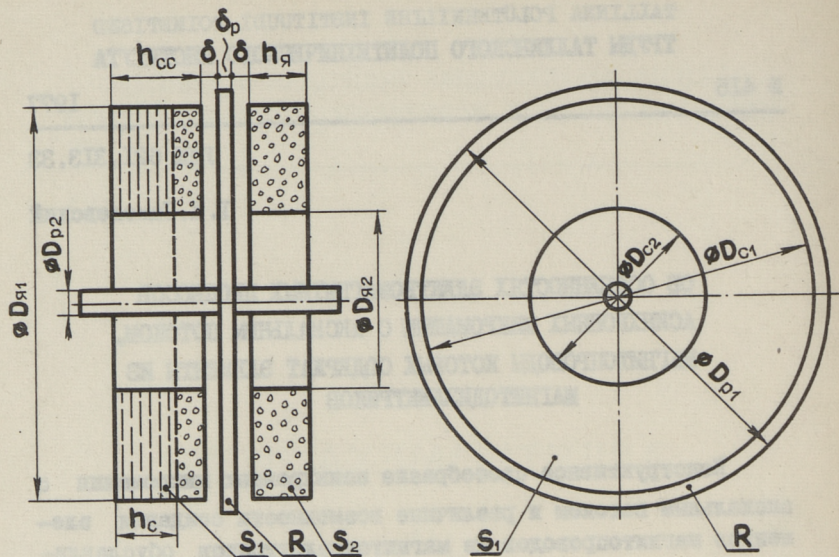
Г. К. Самолевский

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ
АСИНХРОННЫХ МИКРОМАШИН С АКСИАЛЬНЫМ ПОТОКОМ,
МАГНИТОПРОВОДЫ КОТОРЫХ СОДЕРЖАТ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ
МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКОВ

Конструктивное своеобразие асинхронных микромашин с аксиальным потоком и различные возможности создания элементов магнитопроводов из магнитодиэлектриков обуславливают особенности их электромагнитных процессов. Эти обстоятельства являются весьма существенными для асинхронных исполнительных двигателей.

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с определением основных электромагнитных параметров асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком, с учетом специфических свойств его магнитопровода, изготовленного из магнитодиэлектриков. К числу таких свойств следует отнести [1]: пористость отдельных участков магнитопровода; меньшее значение магнитной проницаемости и повышение потери — по сравнению с соответствующими показателями лучших марок электротехнических сталей; наличие короткозамкнутых контуров в сердечнике магнитопровода.

Для анализа принимается конфигурация магнитопровода, описанная в [2] (фиг. 1). Предполагается, что в соответствии с [3] зубцовая зона активного сердечника S_1 изготовлена из зернистого порошка железа, а ярмо прессовано из чешуек железа. Второй сердечник S_2 из магнитодиэлектрика используется в качестве ярма. Ротор двигателя R дисковый из немагнитного токопроводящего материала. Обмотки управления и возбуждения расположены в радиальных пазах.



Фиг. 1: Схема магнитопрода двигателя.

Учет пористости отдельных участков магнитопрода

Пористость отдельных участков магнитопрода следует учитывать при определении геометрических и электромагнитных параметров двигателя — для обеспечения заданного значения основного магнитного потока Φ_y в воздушном зазоре при максимально допустимых значениях индукций B_{cm} , $B_{ям}$ и $B_{зт}$ в сердечниках статора, ярма и в зубцах. Основные геометрические и электромагнитные параметры должны также соответствовать условию обеспечения линейности характеристик и отсутствия самохода исполнительного двигателя [4].

Для количественного выражения пористости отдельных участков магнитопрода введем понятие коэффициентов пористости магнитодиелектрика K_M .

Для активного пакета статора

$$K_{MC} = \frac{l_{MC} - l_{жс}}{l_{MC}}, \quad (I)$$

для ярма

$$K_{\text{мя}} = \frac{l_{\text{мя}} - l_{\text{жя}}}{l_{\text{мя}}}; \quad (2)$$

здесь $l_{\text{мс}}$ и $l_{\text{мя}}$ — расчетные длины силовых линий магнитного потока в магнитоэлектрике активного сердечника статора и в ярме;

$l_{\text{жс}}$ и $l_{\text{жя}}$ — расчетные длины сплошных участков частиц железа в магнитоэлектрике статора и ярма.

В общем случае коэффициенты пористости $K_{\text{мс}}$ и $K_{\text{мя}}$ отличаются по величине.

В соответствии с вышеизложенным длина расчетного немагнитного зазора $\delta_{\text{м}}$ для магнитной системы, изображенной на фиг. 1, определяется следующим выражением

$$\delta_{\text{м}} = \delta(1 + K_{\delta}) + \delta_{\text{р}} + K_{\text{мс}}l_{\text{мс}} + K_{\text{мя}}l_{\text{мя}}, \quad (3)$$

где K_{δ} — коэффициент зубчатости сердечника статора.

Магнитная проницаемость немагнитных участков принимается равной магнитной проницаемости вакуума. Магнитная проницаемость частиц железа $\mu_{\text{ж}} = \infty$.

Аксиальные геометрические размеры сердечников статора и ярма:

$$h_{\text{с}} = \frac{2\Phi_{\text{у}}}{B_{\text{см}}(1 - K_{\text{мс}})(D_{\text{с1}} - D_{\text{с2}})}. \quad (4)$$

$$h_{\text{я}} = \frac{2\Phi_{\text{у}}}{B_{\text{ям}}(1 - K_{\text{мя}})(D_{\text{я1}} - D_{\text{я2}})}. \quad (5)$$

Диаметры $D_{\text{с1}}$, $D_{\text{с2}}$, $D_{\text{р1}}$ и $D_{\text{р2}}$ должны соответствовать выполнению условия обеспечения линейности характеристик и отсутствия самохода двигателя, которое, аналогично [4], с учетом выражения для $\delta_{\text{м}}$ (3) определяется следующей зависимостью:

$$\left[\frac{4p^2(D_{\text{с1}} + D_{\text{с2}})}{D_{\text{с1}} - D_{\text{с2}}} + \frac{D_{\text{р1}} + D_{\text{с1}}}{D_{\text{р1}} - D_{\text{с1}}} - \frac{D_{\text{с2}} + D_{\text{р2}}}{D_{\text{с2}} - D_{\text{р2}}} \right] \frac{\rho_{\text{р}} \cdot K_{\text{р}} [\delta(1 + K_{\delta}) + \delta_{\text{р}} + K_{\text{мс}}l_{\text{мс}} + K_{\text{мя}}l_{\text{мя}}]}{\pi f_0 \mu_0 \delta_{\text{р}} (D_{\text{с1}}^2 - D_{\text{с2}}^2)} \geq 1. \quad (6)$$

В выражении (6) дополнительно к принятым ранее введены обозначения:

ρ_p — удельное сопротивление материала ротора;
 k_r — коэффициент увеличения сопротивления материала ротора;
 f_0 — частота сети;
 μ_0 — магнитная проницаемость воздушного зазора.

Отношение диаметров D_{p1} и D_{c1} следует принимать в данном случае таким же, как для исполнительного двигателя с магнитопроводом из электротехнической стали, т.е.

$$D_{p1} = (1,05 \dots 1,1) D_{c1}.$$

При расчете обмотки управления для двигателя с магнитопроводом из магнитоэлектрика следует учитывать необходимость увеличения числа витков этой обмотки для обеспечения заданного значения индуктивного сопротивления, соответствующего основной гармонике потока взаимной индукции χ_{my} . Действительно, индуктивное сопротивление χ_{my} при значении расчетного немагнитного зазора δ_m (3), аналогично [4], определяется по зависимости

$$\chi_{my} = \frac{\mu_0 f_0 w_y^2 k_{wy}^2 (D_{c1}^2 - D_{c2}^2)}{p^2 [\delta(1 + k_\delta) + \delta_p + k_{mc} l_{mc} + k_{my} l_{my}]}, \quad (7)$$

здесь w_y — число витков обмотки управления;

k_{wy} — обмоточный коэффициент обмотки управления.

Необходимость увеличения числа витков обмотки управления (также и обмотки возбуждения) приводит, следовательно, к неизбежному увеличению геометрических размеров пазов активного пакета статора; однако, при заданных значениях диаметров D_{c1} и D_{c2} , индукции в зубцах B_{3m} , числе пар полюсов p и количестве зубцов z ограничивающим фактором будет минимально допустимая ширина зубцов на среднем диаметре активного пакета статора b_{3cp} :

$$b_{3cp} \geq \frac{4p\Phi_y}{z(D_{c1} - D_{c2})(1 - k_{mc})B_{3m}}. \quad (8)$$

Повышенные потери в магнитоэлектриках

Магнитоэлектрики обладают повышенными электрическими потерями, по сравнению с соответствующими показателями лучших марок электротехнических сталей. Так, например, электрические потери в магнитоэлектриках, изготовленных из

порошка железа ПЖ 1К со связующим на эпоксидной смоле ЭД-5 при частоте 50 Гц и индукции 1,0 Т составляют величину порядка 10 Вт/кг [1]. Исследования потерь в магнитодиэлектриках, проведенные при повышенных частотах показывают, что при частоте 400 Гц и индукции 1,0 Т электрические потери возрастают до 100 Вт/кг.

Следовательно, при применении магнитодиэлектриков в качестве элементов магнитопроводов асинхронных исполнительных двигателей с аксиальным потоком необходимо учитывать, что вследствие весьма больших электрических потерь в магнитопроводах такие двигатели при повышенных частотах способны работать при обычных способах охлаждения (с самовентиляцией) только в кратковременном режиме. Сказанное подтверждается экспериментальными исследованиями опытного образца исполнительного двигателя с аксиальным потоком. Испытания проведены при частоте 400 Гц.

Наличие короткозамкнутых контуров в сердечнике магнитопровода, выполненного из магнитодиэлектрика

Образование короткозамкнутых контуров возможно при механической либо электроискровой обработке отдельных участков зубцовой зоны сердечника магнитопровода, выполненного из магнитодиэлектрика; короткозамкнутые контуры образуются также вследствие неправильной ориентации чешуек наружных слоев сердечника магнитопровода, при прессовании его из чешуек железа [1].

Наличие короткозамкнутых контуров, состоящих из сплошных слоев частиц (либо чешуек) железа в магнитодиэлектрических сердечниках магнитопроводов асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком оказывает существенное влияние на его электромагнитные процессы.

Для рассмотрения этого вопроса в нижеследующем делаются следующие предложения и допущения:

1) обмотки управления и возбуждения статора являются симметричными, распределенными, с пространственным сдвигом по тангенциальной координате $\frac{\pi}{2}$ электрических градусов;

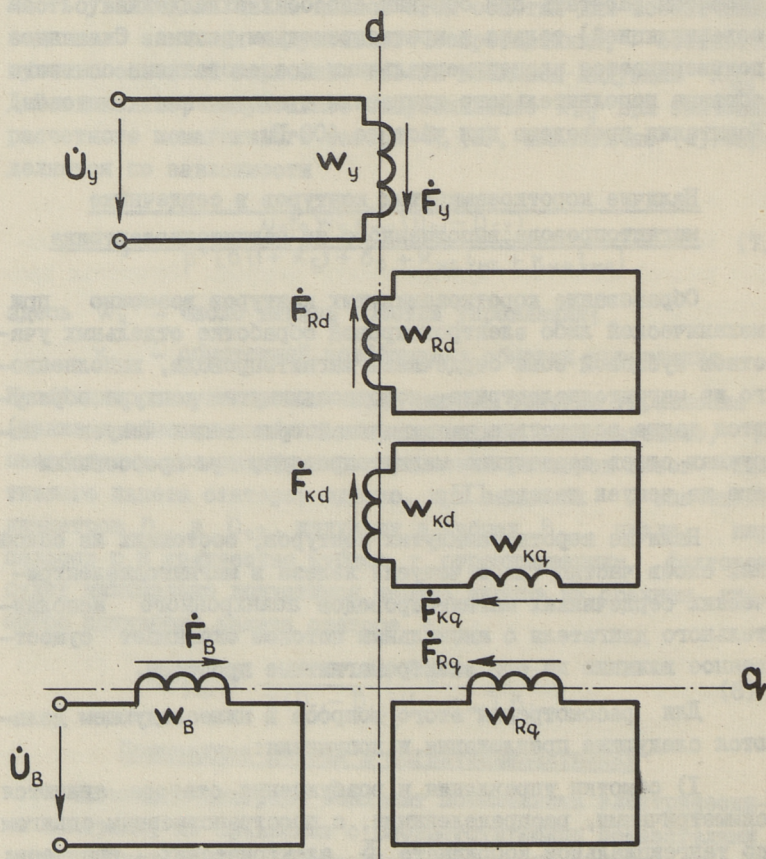
2) торцевые поверхности воздушного зазора плоскопараллельны;

3) учитывается только первая пространственная гармоника индукции поля по тангенциальной координате первичной магнитной системы, высшие гармоники не учитываются;

4) магнитопровод не насыщен;

5) напряжение управления и возбуждения меняется во времени синусоидально, с неизменным фазовым углом $\frac{\pi}{2}$;

6) влияние краевых эффектов не учитывается;



Фиг. 2. Эквивалентная схема двигателя.

7) потоки рассеяния обмоток в переходных режимах меняются по одинаковой закономерности с основными потоками;

8) в отличие от допущений, сделанных в [2], следует предположить, что может существовать взаимдуктивная связь между обмотками статора, возникающая посредством короткозамкнутых контуров магнитопровода. В общем случае пространственный угол между осью обмотки статора (например, обмотки управления) и осью короткозамкнутого витка активного сердечника S_1 статора может иметь значение λ .

С учетом сказанного можно для момента времени включения двигателя в сеть представить его эквивалентную схему в соответствии с фиг. 2. Здесь приняты следующие обозначения витков:

w_y, w_B — количество витков обмоток управления и возбуждения;

w_{Rd}, w_{Rq} — расчетное количество витков обмотки ротора по продольной и поперечной осям;

w_{kd}, w_{kq} — расчетное количество витков короткозамкнутого контура в сердечнике активного пакета статора по продольной и поперечной осям.

Расчетное количество витков короткозамкнутого контура в сердечнике активного пакета статора по осям d и q :

$$w_{kd} = w_k \cos \lambda, \quad (9)$$

$$w_{kq} = w_k \sin \lambda, \quad (10)$$

где w_k — расчетное количество витков короткозамкнутого контура.

Обычно $w_{kd} = w_{kq}$.

В нижеследующем рассмотрим особенности электромагнитных процессов при неподвижном роторе, т.е. в момент пуска двигателя, когда совместное размагничивающее действие н.с. короткозамкнутого контура и н.с. ротора имеет наибольшее значение. При этом для упрощения учитываем потоки их основных гармоник по осям d и q , а их потоками рассеяния пренебрегаем.

С учетом принятых допущений исходные уравнения электромагнитного переходного процесса в операторной форме

записи по Карсону при нулевых начальных условиях имеют следующий вид:

$$(1 + pT_d) \varphi_d(p) - T_{kdq} p \varphi_q(p) = \kappa_y T_y U_y(p), \quad (II)$$

$$(1 + pT_q) \varphi_q(p) - T_{kqd} p \varphi_d(p) = \kappa_B T_B U_B(p). \quad (I2)$$

В уравнениях (II) и (I2) применены обозначения:

$U_y(p), U_B(p)$ — операторные выражения напряжений управления и возбуждения;

$\varphi_d(p), \varphi_q(p)$ — операторные выражения магнитных потоков по продольной и поперечной осям;

T_y, T_B — постоянные времени, соответствующие индуктивности цепей обмоток управления и возбуждения;

T_d — постоянная времени, соответствующая взаимной индукции между цепями обмотки управления, ротора и короткозамкнутого контура в сердечнике активного пакета статора, по продольной оси;

T_q — постоянная времени, соответствующая взаимной индукции между цепями обмотки возбуждения, ротора и короткозамкнутого контура в сердечнике активного пакета статора, по поперечной оси;

T_{kdq}, T_{kqd} — постоянные времени, соответствующие индуктивности цепи короткозамкнутого контура в сердечнике активного пакета статора.

$$U_y(p) = \frac{U_{ym} \omega_0 p}{p^2 + \omega_0^2}, \quad (I3)$$

$$U_B(p) = \frac{\dot{U}_{Bm} p^2}{p^2 + \omega_0^2}, \quad (I4)$$

$$T_y = \frac{w_y^2 \sigma}{\sigma_d r_y}, \quad (I5)$$

$$T_B = \frac{w_B^2 \sigma}{\sigma_q r_B}, \quad (I6)$$

$$T_d = T_y - T_{Rd} - T_{kd}, \quad (I7)$$

$$T_q = T_B - T_{Rq} - T_{kq}, \quad (I8)$$

$$T_{Rd} = \frac{W_{Rd}^2}{\sigma_d \Gamma_{Rd}}, \quad (19)$$

$$T_{kd} = \frac{W_{kd}^2}{\sigma_d \Gamma_k}, \quad (20)$$

$$T_{Rq} = \frac{W_{Rq}^2}{\sigma_q \Gamma_{Rq}}, \quad (21)$$

$$T_{kq} = \frac{W_{kq}^2}{\sigma_q \Gamma_k}, \quad (22)$$

$$T_{k dq} = \frac{W_{kd} \cdot W_{kq}}{\sigma_d \Gamma_k}, \quad (23)$$

$$T_{k qd} = \frac{W_{kq} \cdot W_{kd}}{\sigma_q \Gamma_k}, \quad (24)$$

$$K_y = \frac{1}{\Gamma_y}, \quad (25)$$

$$K_B = \frac{1}{\Gamma_B}. \quad (26)$$

В выражениях (13)...(26), дополнительно к обозначениям, введенным ранее, использованы следующие:

U_{ym}, U_{Bm} — амплитудные значения напряжения управления и возбуждения;

$\Gamma_y, \Gamma_B, \Gamma_{Rd}, \Gamma_{Rq}, \Gamma_k$ — активные сопротивления цепей управления, возбуждения, контуров продольных и поперечных витков обмотки ротора, контура короткозамкнутых витков в сердечнике активного пакета статора — соответственно;

$w_y = 2p_y w'_y k_{wy}$ — расчетное число витков обмотки управления;

$w_B = 2p_B w'_B k_{wB}$ — расчетное число витков обмотки возбуждения;

$w'_y, w'_B, k_{wy}, k_{wB}$ — количество витков на полюс и обмоточные коэффициенты обмоток управления и возбуждения;

$w_{Rd} = w_{Rq}$ — расчетное число витков фазы дискового сплошного ротора;

p_y, p_B — числа пар полюсов обмоток управления и возбуждения; при симметричных обмотках $p_y = p_B$;

σ - среднее значение коэффициента рассеяния;

$a_d = \frac{2\delta_m}{\mu_0 S_{\delta d}}$ - расчетный коэффициент пропорциональности между суммарной намагничивающей силой и основным потоком пары полюсов по продольной оси;

$a_q = \frac{2\delta_m}{\mu_0 S_{\delta q}}$ - расчетный коэффициент пропорциональности между суммарной намагничивающей силой и основным потоком пары полюсов по поперечной оси;

μ_0 - магнитная проницаемость воздушных промежутков, немагнитных зазоров и пор в магнитодиэлектрике;

$S_{\delta d}, S_{\delta q}$ - площадь поперечного сечения потока одного полюса по продольной и поперечной осям;

ω_0 - угловая частота сети.

Оператор $p \doteq \frac{d}{dt}$.

Обычно $w_{kd} = w_{kq}$ и $a_d = a_q$; в этом случае

$$T_{kd} = T_{kq} = T_{k dq} = T_{k qd} = T_k.$$

Решение уравнений (II) и (I2) приводит к выражениям магнитных потоков в операторной форме:

$$\varphi_d(p) = \frac{k_B T_B T_K U_{Bm} p^3 + k_Y T_Y T_q \omega_0 U_{ym} p^2 + k_Y T_Y \omega_0 U_{ym} p}{(p^2 + \omega_0^2)[p^2(T_d T_q - T_K^2) + p(T_d + T_q) + 1]} \quad (27)$$

$$\varphi_q(p) = \frac{k_B T_B T_d U_{Bm} p^3 + (k_B T_B U_{Bm} + k_Y T_Y T_K U_{ym} \omega_0) p^2}{(p^2 + \omega_0^2)[p^2(T_d T_q - T_K^2) + p(T_d + T_q) + 1]} \quad (28)$$

Для сокращения записи введем дополнительно следующие обозначения:

$$T_d + T_q = T_{dq}, \quad (29)$$

$$T_d T_q - T_K^2 = T_{dqk}^2, \quad (30)$$

$$\frac{k_B T_B T_K U_{Bm}}{T_{dqk}^2} = k_{yu}, \quad (31)$$

$$\frac{k_Y T_Y T_q \omega_0 U_{ym}}{k_B T_B T_K U_{Bm}} = \sigma_y. \quad (32)$$

$$\frac{\kappa_y T_y \omega_0 U_{ym}}{\kappa_B T_B T_k U_{Bm}} = b_y, \quad (33)$$

$$\frac{T_{dq} - \sqrt{T_{dq}^2 - 4T_{dqk}^2}}{2T_{dqk}^2} = b, \quad (34)$$

$$\frac{T_{dq} + \sqrt{T_{dq}^2 - 4T_{dqk}^2}}{2T_{dqk}^2} = c, \quad (35)$$

$$\frac{\kappa_B T_B T_d U_{Bm}}{T_{dqk}^2} = \kappa_{Bu}, \quad (36)$$

$$\frac{\kappa_y T_y T_k U_{ym} \omega_0 + \kappa_B T_B U_{Bm}}{\kappa_B T_B T_d U_{Bm}} = a_B. \quad (37)$$

Преобразуя выражения (27), (28), с учетом обозначений (29)...(37), находим в соответствии с теоремами операционного исчисления зависимости магнитных потоков в функции времени:

$$\begin{aligned} \varphi_d(t) = & \frac{\kappa_{yu}(b^2 - a_y b + b_y)}{(c-b)(\omega_0^2 + b^2)} e^{-bt} + \frac{\kappa_{yu}(c^2 - a_y c + b_y)}{(b-c)(\omega_0^2 + c^2)} e^{-ct} + \\ & + \frac{\kappa_{yu}}{\omega_0} \sqrt{\frac{(b_y - \omega_0^2)^2 + a_y^2 \omega_0^2}{(\omega_0^2 + b^2)(\omega_0^2 + c^2)}} \cdot \sin(\omega_0 t + \lambda_y); \end{aligned} \quad (38)$$

$$\lambda_y = \arctan \frac{a_y \omega_0}{b_y - \omega_0^2} - \arctan \frac{\omega_0}{b} - \arctan \frac{\omega_0}{c}. \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \varphi_B(t) = & \frac{\kappa_{By}(b^2 - a_B b)}{(c-b)(\omega_0^2 + b^2)} e^{-bt} + \frac{\kappa_{By}(c^2 - a_B c)}{(b-c)(\omega_0^2 + c^2)} e^{-ct} + \\ & + \kappa_{By} \sqrt{\frac{\omega_0^2 + a_B^2}{(\omega_0^2 + b^2)(\omega_0^2 + c^2)}} \cdot \sin(\omega_0 t + \lambda_B); \end{aligned} \quad (40)$$

$$\lambda_B = -(\arctan \frac{a_B}{\omega_0} + \arctan \frac{\omega_0}{b} + \arctan \frac{\omega_0}{c}). \quad (41)$$

Представляет интерес выражение установившегося значения э.д.с. в обмотке управления, при $t \rightarrow \infty$, найденное путем дифференцирования выражения (38):

$$e_y(t) = -2p_y w_y' k_{wy} k_{yu} \sqrt{\frac{(b_y - \omega_0^2)^2 + a_y^2 \omega_0^2}{(\omega_0^2 + b^2)(\omega_0^2 + c^2)}} \cos(\omega_0 t + \lambda_y). \quad (42)$$

При отключении обмотки управления $U_{ym} = 0$; $a_y = 0$; $b_y = 0$.

Очевидно, что и в этом случае в обмотке управления наводится э.д.с. e_{y0} (нулевой сигнал) вследствие наличия взаимной индуктивной связи между обмотками управления и возбуждения посредством короткозамкнутого контура в сердечнике активного пакета статора:

$$e_{y0}(t) = -2p_y w_y' k_{wy} k_{yu} \omega_0^2 \sqrt{\frac{1}{(\omega_0^2 + b^2)(\omega_0^2 + c^2)}} \cos(\omega_0 t + \lambda_y). \quad (43)$$

$$\lambda_y = -\arctan \frac{\omega_0}{b} - \arctan \frac{\omega_0}{c}. \quad (44)$$

С учетом обозначений (31), (34), (35) выражение (43) преобразуется к виду:

$$e_{y0}(t) = -\frac{w_y}{w_B} T_B T_K \omega_0^2 U_{Bm} \sqrt{\frac{1}{\omega_0^4 T_{dqk}^4 + \omega_0^2 (T_{dq}^2 - T_{dqk}^2) + 1}} \cos(\omega_0 t + \lambda_y). \quad (45)$$

Действующее значение нулевого сигнала в отключенной обмотке управления

$$E_{y0} = \frac{w_y}{w_B} T_B T_K \omega_0^2 U_{Bm} \sqrt{\frac{1}{2 [\omega_0^4 T_{dqk}^4 + \omega_0^2 (T_{dq}^2 - T_{dqk}^2) + 1]}}. \quad (46)$$

В качестве примера проведен расчет э.д.с. E_{y0} для опытного образца асинхронного исполнительного двигателя с аксимальным потоком, магнитопровод которого выполнен из магнетодизэлектрика на базе порошка железа ПЖ I со связкой на эпоксидной смоле ЭД-5. Конфигурация магнитопровода соответствует изображенной на фиг. I.

Исходные данные геометрических и электромагнитных параметров магнитной системы и обмоток:

$$\begin{aligned}
 D_{c1} &= 80 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & D_{c2} &= 58 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & D_{p1} &= 88 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\
 D_{p2} &= 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & D_{я1} &= 80 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & D_{я2} &= 58 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\
 h_{cc} &= 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & h_{я} &= 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & \delta_p &= 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\
 \delta_m &= 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & z &= 36; & 2p &= 2; & w_y = w_b &= 360; \\
 w_k &= 1; & f_0 &= 400 \text{ Гц}; & U_b &= 24 \text{ В}.
 \end{aligned}$$

По выражению (46) найдено значение $E_{y0} = 20$ мВ. Опытные исследования указанного образца двигателя подтверждают наличие нулевого сигнала в отключенной обмотке управления, величины такого же порядка, что снижает качество характеристик и регулировочные свойства двигателя.

Вышеизложенное указывает на необходимость осуществления такой технологии изготовления сердечников магнитопроводов из магнитодиэлектриков, где была бы исключена любая возможность образования в них короткозамкнутых контуров.

Л и т е р а т у р а

1. В а р и к Л.Э., Л а а н с о о А.А., М а з и н г Ю.К., П а к к а с Л.Р., Р и т с о А.Э., С а м о л е в с к и й Г.К. О возможностях использования магнитодиэлектриков в магнитопроводах электрических микромашин. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 369, 1974.

2. В а р и к Л.Э., С а м о л е в с к и й Г.К. О некоторых особенностях электромагнитных процессов двухфазного асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 337, 1973.

3. К о р и ц к и й А.В., С а м о л е в с к и й Г.К., Р и т с о А.Э., Л а а н с о о А.А., В а р и к Л.Э. Магнитопровод статора торцевой электрической микромашины из отверждаемого магнитодиэлектрического материала. Авт. свид. № 485524 от 29 мая 1975 г.

4. В а р и к Л.Э., С а м о л е в с к и й Г.К. Об обеспечении линейности регулировочных характеристик и отсутствия самохода двухфазных асинхронных исполнительных двигателей с аксиальным потоком. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 337, 1973.

Von den Besonderheiten der elektromagnetischen Prozesse der asynchronischen Mikromaschinen mit achsialem Fluß, deren Magnetsysteme die magnetdielektrischen Elemente enthalten

Zusammenfassung

Der Artikel behandelt die Forschung der elektromagnetischen Prozesse im asynchronischen Servomotor mit achsialem Fluß, dessen Magnetsystem aus magnetdielektrischen Elementen gebildet ist. Es werden Formeln geäußert, die Grundmaße des Magnetsystems bestimmen. Ebenso sind die Zusammenhänge für die elektromagnetischen Parameter geäußert.

Als Illustration sind bei dem im Artikel beschriebenen Versuchsmotor die eksperimentell erhaltenen Werte der Parameter gegeben.

УДК 621.313.13.043-181.4
621.762

Л.Э.Варж, А.А. Лаансоо, А.Э.Ритсо
Г.К.Самолевский

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКОВ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТОРЦЕВЫХ
АСИНХРОННЫХ МИКРОМАШИНАХ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ
ЧАСТОТАХ

Коренного изменения технологического процесса изготовления пакета статора и ротора асинхронных микромашин можно достичь применением магнитодиэлектриков в качестве магнитопровода. В этом случае можно получить пакет статора и ротора за один цикл прессы с последующей термической обработкой пакета. Весь процесс может состоять из следующих операций.

1. Плакирование равноосного и чешуйчатого железного порошка тонким слоем изолирующего связующего вещества, например, эпоксидной смолой с отвердителем м-фенлنديамин.

2. Прессование пакета. Для получения высокой магнитной проницаемости в направлении магнитного потока целесообразно зубцы пакета прессовать из равноосных частиц железа, а ярмо из чешуеобразных частиц железа. Ввиду этого в нижнюю часть прессформы, где образуются зубцы, засыпают порошок железа из равноосных частиц, а в верхнюю часть, где образуется ярмо — чешуйчатый порошок железа. Прессование пакета можно осуществить при давлении от 500 Мн/м^2 до 900 Мн/м^2 . Процесс прессования хорошо осуществляется на прессах-автоматах или на роторных прессах.

3. Термическая обработка пакета статора и ротора осуществляется для увеличения его механической прочности и в некоторых случаях для снятия наклепа от прессования брикета.

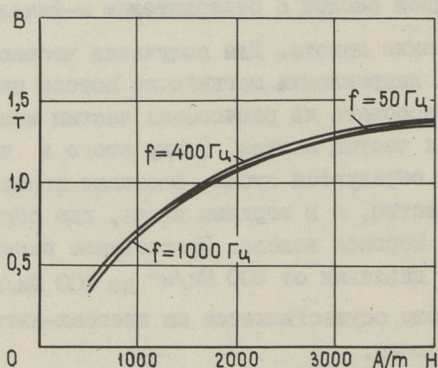
При использовании синтетических смол, например, эпоксидной смолы, для отверждения смолы требуется температура 150 – 180 °С. При таком низкотемпературном нагреве процесс рекристаллизации в чешуйках железа не происходит и внутренние напряжения II рода не снимаются.

При использовании в качестве связующего гидролизованного раствора этилсиликата целесообразно осуществить термическую обработку при температуре 450–600 °С. При такой температуре внутренние напряжения в частицах железа значительно уменьшаются, что приводит к некоторому повышению магнитной индукции и магнитной проницаемости в постоянном и переменном (50 Гц) магнитном поле.

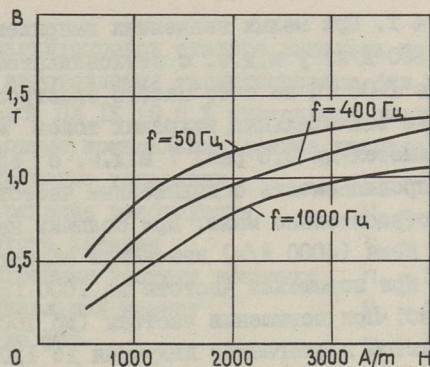
Большое влияние на электромагнитные характеристики имеют такие характеристики исходного материала как внутренняя структура частиц железного порошка, их величина, конфигурация частиц и химический состав железного порошка, вид и количество связующего.

Из технологических параметров наибольшее влияние на электромагнитные характеристики имеют режимы отжига железного порошка, схема прессования магнитопроводов и режим термической обработки спрессованных пакетов.

В проведенных нами опытах были применены железный порошок ПЖ ДК (ГОСТ 9849–61) в прокатанном и отожженном виде.



Фиг. 1. Зависимость $B = f(H)$ магнитоэлектрика с содержанием связующего 0,6 % ЭД-5.



Фиг. 2. Зависимость $B = f(H)$ магнитоэлектрика с содержанием связующего 0,5% этилсиликата.

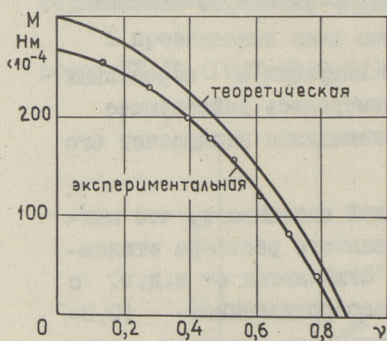
В качестве связующего были использованы эпоксидная смола ЭД-5 с отвердителем м/фенилендиамин и гидролизованный раствор этилсиликата. Покрытие чешуек железа тонкой изолирующей связующей пленкой было осуществлено сольвент-методом, где в качестве растворителя был использован ацетон. После испарения связующего, из этих композиций были спрессованы тороиды диаметром 40 и 50 мм, которые после термической обработки подвергались электромагнитным измерениям (фиг. 1, 2).

При определении максимальной индукции в переменных полях частотой от 50 до 1000 Гц измерялось действующее значение напряженности поля и производился перерасчет его амплитудного значения.

Анализ результатов исследований показывает, что магнитоэлектрики с 0,5% гидролизованного раствора этилсиликата (в пересчете на кремнезем) отличаются от м.д.э. с 0,6% ЭД-5 низким удельным электросопротивлением ($0,2 - 0,3 \cdot 10^{-6}$ Ом.м), то есть в 70 раз ниже, чем удельное электросопротивление м.д.э. с эпоксидной смолой. Такая большая разница объясняется, в первую очередь большей площадью пленки из эпоксидной смолы на чешуйках железа. М.д.э. с этилсиликатом отличаются относительно низкой коэрцитивной силой и высокой магнитной индукцией в постоянном и переменном (50 Гц) магнитном поле, которая достига-

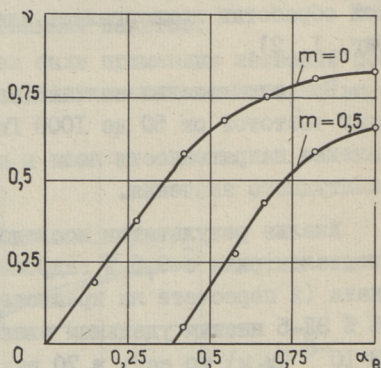
ет значения до 1,4 Т. При малых значениях напряженности магнитного поля (500 А/м) у м.д.э. с этилсиликатом при повышении частоты до 1000 Гц за счет малого электросопротивления и образования значительных вихревых токов магнитная проницаемость снижается до 2,5 раз. У м.д.э. с эпоксидной смолой магнитная проницаемость с повышением частоты до 1000 Гц меняется относительно мало. При больших напряженностях магнитного поля (4000 А/м) изменение магнитной проницаемости м.д.э. при повышении частоты до 1000 Гц происходит незначительно. При повышении частоты (до 1000 Гц) у м.д.э. с этилсиликатом достигается индукция до 1,07 Т, а у м.д.э. с эпоксидной смолой – до 1,36 Т (при напряженности магнитного поля 4000 А/м). Удельные потери на перемагничивание образцов с эпоксидной смолой при 400 Гц и индукции $B_m = 1,0$ Т составляли 80–100 Вт/кг.

Выбор подходящих м.д.э. для конкретных магнитопроводов зависит от конкретных условий работы. Для пакета статора асинхронного торцевого двигателя, работающего при частоте 400 Гц, с точки зрения магнитной индукции, магнитной проницаемости и потерь на перемагничивание можно использовать м.д.э. из чешуйчатого железного порошка с эпоксидной смолой.



Фиг. 3.

Механические характеристики.



Фиг. 4.

Регулировочные характеристики.

Для исследования был спроектирован, изготовлен и испытан асинхронный торцевой исполнительный двигатель, у ко-

торого магнитопровод статора выполнен из магнитодиэлектрика. Для изготовления магнитопровода был применен чешуйчатый порошок ПЖ К (0,6 % эпоксидной смолы).

Основные номинальные данные двигателя следующие:

напряжение управления	$U_y = 36 \text{ В,}$
напряжение возбуждения	$U_b = 36 \text{ В,}$
частота питания	$f_0 = 400 \text{ Гц,}$
синхронная частота вращения	$n_0 = 8000 \text{ об/мин,}$
номинальный момент	$M_n = 200 \text{ Г см,}$
число фаз	$m = 2.$

Механические характеристики (теоретическая и экспериментальная) представлены на фиг.3. Экспериментально снятая механическая характеристика незначительно отличается от теоретической. На фиг. 4 представлена экспериментально снятая регулировочная характеристика двигателя. Двигатель работал без перегрева сверх допустимых значений температуры в кратковременном режиме.

Л и т е р а т у р а

1. Варик Л.Э., Лаансоо А.А., Мазинг Ю.К., Паккас Л.Р., Ритсо А.Э., Самолевский Г.К. О возможностях использования магнитодиэлектриков в магнитопроводах электрических микромашин. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 369, 1974, с. II-26.

2. Ритсо А.Э., Лаансоо А.А. Чешуйчатые магнитодиэлектрики для магнитопроводов электрических машин. Материалы конференции. "Исследование, разработка и внедрение магнитодиэлектриков в электропромышленности". Харьков, 1974, с. 56-62.

3. Лаансоо А.А., Ритсо А.Э. Ш-образные магнитопроводы из магнитодиэлектрика. "Электротехническая промышленность", вып. II (64), М., с. II-13.

L. Varik, A. Laansoo, A. Ritso,
G. Samolevski

About Some Properties of Magnetodielectric Materials
Used in Axial Magnetic Flux Asynchronous Servomotors
at Higher Frequencies

Summary

In this paper the results of an investigation of the technology and magnetic properties of flake-iron magnetodielectric materials at 50 - 1000 c/s are presented. The experimental parameters of the axial flux asynchronous servomotor with a stator of magnetodielectric material have been given. The operating frequency of the servomotor was 400 c/s.

УДК 621.316.723

В.С.Орлов, Я.Я.Ярвик

РЕЗОНАНСНЫЙ ОГРАНИЧИТЕЛЬ ТОКА КОРОТКОГО
ЗАМЫКАНИЯ НА БАЗЕ НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ РЕАКТОРА
С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

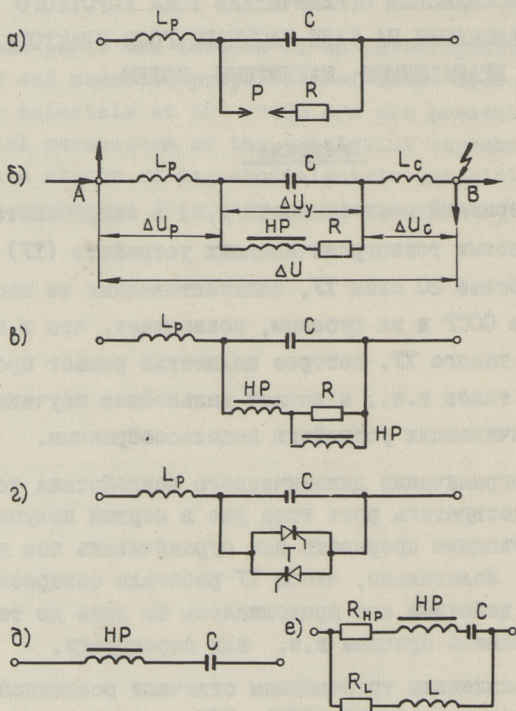
Введение

Непрерывный рост мощности к.з. в энергосистемах делает изучение новых токоограничивающих устройств (ТУ) актуальным. Изучение более 30 схем ТУ, запатентованных за последние десять лет в СССР и за рубежом, показывает, что в настоящее время нет такого ТУ, которое полностью решает проблему ограничения токов к.з., и делает дальнейшее изучение других токоограничивающих устройств нецелесообразным.

Для ограничения динамического воздействия тока к.з. важно предотвратить рост тока уже в первый полупериод. Поэтому необходимо прерывать или ограничивать ток практически мгновенно. Желательно, чтобы ТУ работало совершенно автоматически и действие его продолжалось бы лишь до тех пор, пока не устранена причина к.з. или перегрузки.

Предъявленным требованиям отвечают резонансные токоограничивающие устройства (РТУ). РТУ состоит из последовательно соединенных индуктивности L_p и емкости конденсаторных батарей (КБ), настроенных в резонанс. Конденсатор шунтирован нелинейным элементом (см. фиг. 1), в качестве которого может быть использован разрядник (а), насыщающийся реактор (б, в, е) или управляемые вентили (г). Назначение элементов шунтирующей цепи состоит в расстраивании резонанса в случае нарушения нормального режима, обеспечении демпфирования колебаний напряжений на емкости в переходном процессе и рас-

сеивании энергии при разрядке конденсаторов. К этим элементам предъявляются требования четкого срабатывания или насыщения при заданном значении напряжения на емкости, а также устойчивости к протеканию сквозных токов к.з., которые могут достигать значительных величин. Изоляция шунтирующих элементов должна быть рассчитана на полное рабочее напряжение сети. Проведенные исследования подтверждают перспективность подобных РТУ [1, 2, 3, 4 и др.].



Фиг. 1. Принципальные схемы параметрических токоограничивающих устройств.

В данной работе оцениваются возможности и специфика применения в качестве нелинейного шунтирующего элемента насыщающегося реактора (НР) с вращающимся магнитным полем.

Особенности применения насыщающегося реактора
с вращающимся магнитным полем для ограничения
токов короткого замыкания

В [5] перечислены такие достоинства НР с вращающимся магнитным полем (ВМП), как высокая перегрузочная способность, синусоидальность потребляемых токов и напряжения на зажимах реактора, относительная простота конструкции (состоит из трехфазной обмотки и симметричного магнитопровода). Вид магнитопровода и обмоток приведены в [9]. Относительно легко можно освоить их серийный выпуск.

Однако основной особенностью с точки зрения применения НР и ВМП в схеме резонансного ТУ является то обстоятельство, что все три фазы имеют общий магнитопровод. Поэтому следует ожидать, что в случае несимметричных к.з., эффективность трехфазного реактора окажется несколько ниже, чем в случае однофазного насыщающегося реактора.

Для оценки возможности применения НР с ВМП^{*)} в схеме резонансного ТУ исследуем лишь схему фиг. 1,б. Активное сопротивление R в цепи установки обеспечивает требуемое качество переходного процесса в режиме к.з.

Для удобства расчетов и анализа работы установки, вольт-амперная характеристика НР аппроксимируется двумя прямыми (см. фиг. 2). Обозначим через $b_{нр}$, $b_{кб}$, b_c и b_p статические реактивные проводимости НР, КБ, собственно сети и бетонного реактора. Тогда потеря напряжения ΔU (при пренебрежении активным сопротивлением элементов) на участке АВ (см. фиг. 1,б) равна

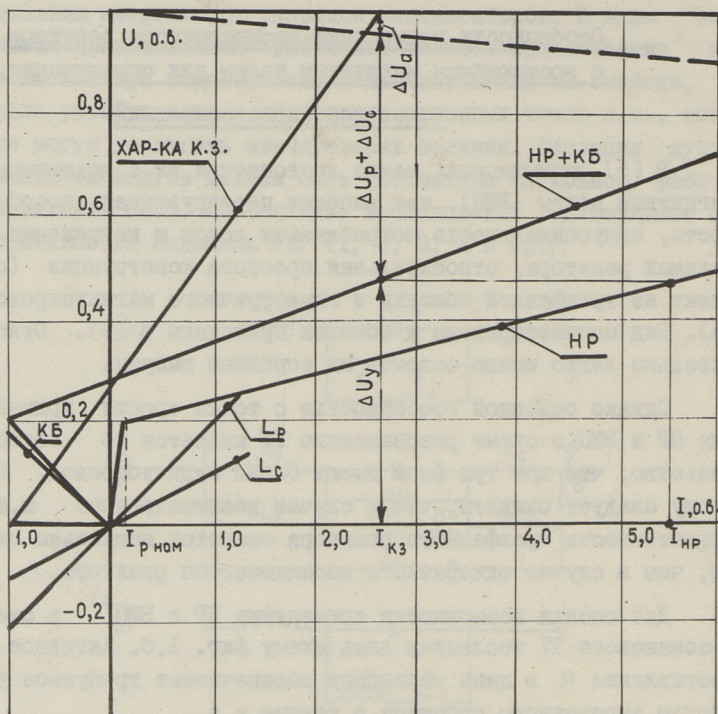
$$\Delta U = I \sin \varphi \left(\frac{1}{b_p} + \frac{1}{b_c} + \frac{1}{b_{нр} + b_{кб}} \right), \quad (I)$$

где I — ток в сети;

φ — угол сдвига между током и напряжением сети.

В нормальном режиме ток НР не превышает значение $I_{нр} \leq I_{нрн}$ ($\Delta U_{нр} \leq \Delta U_{нрн}$), и проводимость реактора определяется отношением $b_{нр} = I_{нрн} / \Delta U_{нрн}$. Потеря напряжения в

^{*)} Здесь и далее под словом насыщающийся реактор (НР) понимается НР с вращающимся магнитным полем.



Фиг. 2. Вольт-амперные характеристики токоограничивающей установки и графическое определение токов к.з.

нормальном режиме на участке АВ должна быть равной нулю, тогда из (I)

$$\frac{1}{b_p} + \frac{1}{b_c} + \frac{1}{b_{НР} + b_{КБ}} = 0,$$

определяем требуемую величину $b_{КБ}$ при заданных $b_{НР}$ и b_p

$$\left. \begin{aligned} b_{КБ} &= -b_{НР} - \frac{b_c \cdot b_p}{b_c + b_p}; \\ b_{КБ} &= -b_{НР} - b_p. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

С учетом пропорциональной зависимости между сквозным током установки и напряжением на НР, его параметры выбираются такими, что насыщение магнитопровода происходит при токах, превышающих максимальный рабочий ток любого из узлов.

При возникновении к.з. НР практически безинерционно переходит в режим глубокого насыщения, его проводимость

резко увеличивается, в результате чего эквивалентная проводимость установки принимает индуктивный характер.

Проводимость реактора в режиме к.з. равна

$$b_{\text{НР}}^{\text{к.з.}} = \frac{I_{\text{НРН}} + (\Delta U_{\text{У}} - \Delta U_{\text{НРН}}) b_{\text{НРДин}}}{\Delta U_{\text{У}}}, \quad (3)$$

где $\Delta U_{\text{У}}$ — потеря напряжения на участке НР;

$b_{\text{НРДин}}$ — динамическая проводимость НР в области насыщения.

В режиме к.з. потеря напряжения в сети до места к.з. равна напряжению неповрежденного узла при данном токе к.з.

$$U = \Delta U_{\text{Р}} + \Delta U_{\text{У}} + \Delta U_{\text{С}},$$

пренебрегая активными сопротивлениями элементов можно написать

$$U = I_{\text{кз}} \frac{1}{b_{\text{Р}}} + I_{\text{кз}} \frac{1}{b_{\text{НР}}^{\text{кз}} + b_{\text{КБ}}} + I_{\text{кз}} \frac{1}{b_{\text{С}}}, \quad (4)$$

где U — напряжение неповрежденного узла;

$I_{\text{кз}}$ — ток к.з. при наличии РГУ.

Из (4) с учетом (3) определяем:

— ток к.з.

$$I_{\text{кз}} = \frac{U - \Delta U_{\text{расч}}}{x_{\text{Р}} + x_{\text{С}} + \Delta x_{\text{расч}}}; \quad (5)$$

$$\Delta U_{\text{расч}} = \frac{\Delta U_{\text{НРН}} b_{\text{НРДин}} - I_{\text{НРН}}}{b_{\text{НРДин}} + b_{\text{С}}}; \quad (6)$$

$$\Delta x_{\text{расч}} = \frac{1}{b_{\text{НРДин}} + b_{\text{С}}}; \quad x_{\text{Р}} = \frac{1}{b_{\text{Р}}}; \quad x_{\text{С}} = \frac{1}{b_{\text{С}}}; \quad (7)$$

— потерю напряжения на участке НР

$$\Delta U = \frac{\Delta U_{\text{НРН}} b_{\text{НРДин}} + I_{\text{кз}} - I_{\text{НРН}}}{b_{\text{НРДин}} + b_{\text{С}}}; \quad (8)$$

— ток, протекающий через НР

$$I_{\text{НР}} = I_{\text{НРН}} + (\Delta U_{\text{У}} - \Delta U_{\text{НРН}}) b_{\text{НРДин}}. \quad (9)$$

В вышеприведенных формулах $\Delta U_{\text{расч}}$ и $\Delta x_{\text{расч}}$ — расчетные величины напряжения и сопротивления, $I_{\text{НР}}^{\text{кз}}$ — ток НР при к.з.

С учетом активного сопротивления сети, ток к.з. будет несколько меньше

$$I_{кз}^R = \frac{U - \Delta U_{расч}}{\sqrt{(X_p + X_c + \Delta X_{расч})^2 + R^2}} \quad (10)$$

На фиг. 2 приведены вольт-амперные характеристики элементов сети и установки и дана графическая иллюстрация определения тока к.з.

Активное сопротивление установки равно: - при последовательном включении с НР $R = (0,3 \dots 0,5) X_c$; - при параллельном включении $R = (6 \dots 12) X_c$. При наличии активного сопротивления в цепи установки феррорезонанса токов и напряжений в явном виде не существует и они не могут быть опасными для установки.

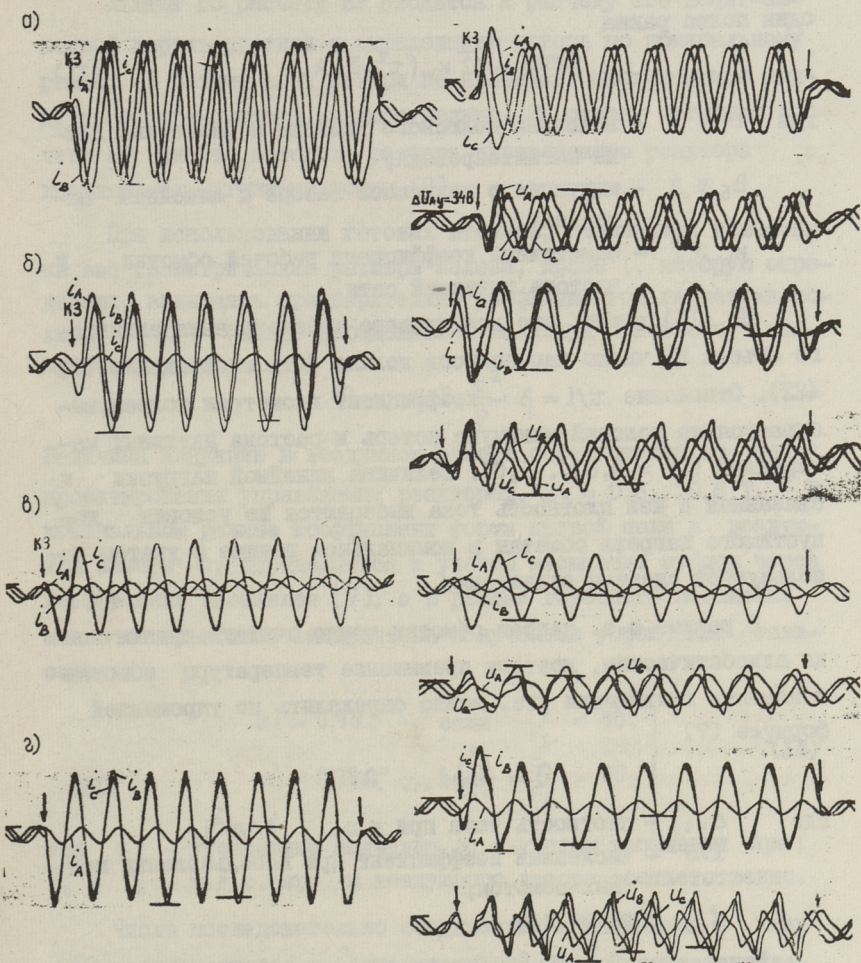
В несимметричном режиме, при несимметричном к.з. вольт-амперные характеристики НР смещаются в зависимости от коэффициента несимметрии по фазам. Результирующая характеристика может быть определена, используя [6].

В приложении I приведен пример расчета одного участка сети с токоограничивающим устройством. Как следует из примера, при наличии установки напряжение в узле В равно номинальному, т.е. потеря напряжения в сети от реактивной составляющей равна нулю. В режиме к.з. при наличии установки кратность тока к.з. значительно меньше и ее величина зависит от выбранных параметров установки.

Насыщающийся реактор с вращающимся магнитным полем

Сходство магнитопровода и трехфазной обмотки НР с обмоткой и магнитопроводом трехфазного двигателя (фиг. 3[9]) позволяет использовать готовые штампы, применяемые при штамповке железа статора двигателей для случая НР, что подтверждено предварительными расчетами и изготовлением опытного образца НР-150 на ГАЗ-е г. Горький.

Требуемые минимальные геометрические размеры паза для размещения обмотки с пазовой изоляцией на данный класс напряжения определяют расчетную мощность НР ($S_{расч}$), которая больше проходной $S_{прох} = 3 \Delta U_{НР} I_{НР}$. Расчетная мощность на



Фиг. 3. Осциллограммы токов к.з. и напряжения при отсутствии установки (осциллограммы слева) и при наличии установки (справа). Исходный ток $I_A = I_B = I_C = 6 \text{ A}$. а - трехфазное к.з.; б - двухфазное к.з.; в - однофазное на землю; г - двухфазное на землю.

один полюс равна

$$\frac{S_{расч}}{2p} = \sqrt{2} k_w f \tau^2 l B_\delta A, \quad (II)$$

где τ и l — величина полюсного деления и расчетная длина магнитопровода;

B_δ и A — индукция в воздушном зазоре и линейная нагрузка;

k_w и f — обмоточный коэффициент рабочей обмотки и частота питающей сети.

Из (II) видно, что для лучшего использования активного объема НР число пар полюсов должно быть минимальным ($2p = 2$). Отношение $\tau/l = \beta$ — коэффициент геометрии полюса, выбирается из условий минимума потерь и расхода активных материалов ($\beta = 0,63 \dots 1,0$). Величина линейной нагрузки и связанная с ней плотность тока выбираются из условия допустимого нагрева обмотки в номинальном режиме с учетом используемой системы охлаждения.

В режиме к.з. нагрев обмотки можно считать практически адиабатическим, поэтому превышение температуры обмотки к моменту ликвидации к.з. можно определить по упрощенной формуле [7]

$$\theta = \frac{\Delta_{кз}^2}{175} t_{кз}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (I2)$$

где $\Delta_{кз}$ — плотность тока при к.з., А/мм^2 ;

175 — численный коэффициент при использовании медных обмоток;

$t_{кз}$ — время к.з., с.

Подставляя $\theta = 45^\circ\text{C}$ (класс изоляции А) или $\theta = 60^\circ\text{C}$ (класс изоляции В) получим допустимую плотность тока при данном времени к.з. Поскольку современные выключатели имеют время отключения $0,1 \dots 0,3$ с, то плотность тока в режиме к.з. может быть равной $\Delta_{кз} = 50 \dots 70 \text{ А/мм}^2$.

Насыщенный реактор с вращающимся магнитным полем может иметь и большую устойчивость к динамическим усилиям, действующим на обмотку в режиме к.з., если соответствующим образом укрепить лобовые части обмоток, например, по опыту крепление лобовых частей в ударных генераторах.

Задача по расчету НР сводится к расчету его вольт-амперной характеристики и определению потерь по номинальному режиму. В режиме к.з. потери не являются определяющими ввиду кратковременности данного режима. За основу методики расчета НР принята методика расчета управляемого реактора с вращающимся магнитным полем [8].

При использовании готовых штампов, становятся известными все геометрические размеры железа, кроме l , которую определяют, задаваясь предварительно коэффициентом геометрии полюса $l = \tau / \beta$. Далее определяется величина основного магнитного потока

$$\Phi_{1m} = \alpha_i B_\delta \frac{\tau^2}{\beta} \quad (13)$$

Величина индукции в воздушном зазоре определяется по опыту проектирования управляемых реакторов, $B_\delta = 0,6 \dots 0,8$ Т. В номинальном режиме коэффициент формы кривой поля в воздушном зазоре α_i определяется с учетом насыщения зубцов через коэффициент насыщения [7], а в режиме глубокого насыщения можно использовать эмпирически полученные упрощенные зависимости

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i' &\approx 0,9 \alpha_i - \text{если } \frac{F_a}{F_\delta} \leq 50; \\ \alpha_i' &\approx 0,75 \alpha_i - \text{если } \frac{F_a}{F_\delta} > 50, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где α_i' — уточненные значения α_i с учетом насыщения ярм; F_a и F_δ — м.д.с. ярм и воздушного зазора соответственно.

Число последовательно соединенных проводников в пазу (S_n) определяется в зависимости от номинального напряжения реактора и числа параллельных ветвей (a)

$$S_n = \frac{\Delta U_{НРН} 2m a}{C K_w z \Phi_{1m}} \quad (15)$$

где $C = 222$ — постоянный коэффициент при $f = 50$ Гц;
 z — число пазов (зубцов);
 m — число фаз.

Число параллельных ветвей рекомендуется выбрать $a = 2$.

Предварительную плотность тока при данном числе S_n можно определить по выражению

$$\Delta = \frac{S_n 0,2 I_{нмакс} z}{\Lambda_1 \Lambda_2 \varphi_{cu} 2 p \tau^2} \leq \Delta_{доп}, \quad (I6)$$

где φ_{cu} — коэффициент заполнения паза медью;

Δ и $\Delta_{доп}$ — действительная и допустимая плотности тока в номинальном режиме;

$0,2 I_{нном}$ — приближенное значение тока реактора в номинальном режиме, определенное многочисленными расчетами установок для сети напряжения 6 — 10 кВ;

Λ_1, Λ_2 — коэффициент глубины и ширины паза.

Сечение внутреннего насыщаемого ядра выбирается в зависимости от сорта стали, который в свою очередь определяет начало участка насыщения в кривой намагничивания стали

$$h_{я} = K_v \frac{\Phi_{1m}}{2 B_{я l}}, \quad (I7)$$

где $K_v = 1,4 \dots 1,6$ — коэффициент, учитывающий увеличение напряжения в режиме насыщения;

$B_{я} \approx 2 \text{ Т}$ (сталь Э — 4I, 42);

$B_{я} \approx 1,8 \text{ Т}$ (сталь Э II, I2).

В качестве примера в приложении 2 рассчитан НР, если заданы его геометрические размеры и соответствующие характеристики стали.

Экспериментальные исследования^{*}

Перед экспериментальным исследованием ставились следующие задачи:

1. Изготовление насыщаемого реактора с вращающимся магнитным полем и проверка справедливости рассмотренной методики расчета вольт-амперной характеристики.

2. Проверка справедливости расчетных выражений (I) — (9).

3. Исследование формы кривой тока в сети при включенном ТУ (при синусоидальном и несинусоидальном токе нагрузки).

^{*} На одной установке все эксперименты выполнил инженер Т.А.Куусман.

4. Проверка токоограничивающих способностей установки и устойчивости электромагнитного режима в момент к.з.

5. Проверка работоспособности РТУ в несимметричных режимах к.з.

6. Оценка возможности возникновения субгармонических колебаний.

Экспериментальные установки изготовлялись как в Горьковском так и в Таллинском политехнических институтах. В ИПИ модель НР была изготовлена на базе ярма из готового железа марки ЭИИ-0,5 (номинальные данные $I_{нрн} = 5 \text{ А}$, $U_{нрн} = 30 \text{ В}$), а в ТПИ мощность НР составляла 7 кВА. Охлаждение у реакторов естественное воздушное.

В экспериментальных трехфазных схемах РТУ измерялись токи во всех ветвях схемы, а также падения напряжения на всех элементах. Переходные процессы в моделируемой сети фиксировались при помощи I2 шлейфового осциллографа типа Н-105.

Экспериментальные исследования показали:

1. Снятые вольт-амперные характеристики НР от расчетных отличались не более чем на 10 %.

2. Параметры экспериментальной установки, рассчитанные по аппроксимированной вольт-амперной характеристике НР с применением расчетных формул (I)-(9), удовлетворительно совпадают с параметрами установки, определенными в результате экспериментов. Погрешность расчета составляет 7-10 %.

3. При синусоидальном токе нагрузки ток в сети практически синусоидален, он сохраняет свою синусоидальность и в режиме симметричного к.з. При несинусоидальном токе нагрузки наблюдается некоторое ослабление высших гармоник тока, очевидно соответствующих порядку гармоник

$$\gamma = L_{нр} / (1 - \omega^2 L_{нр} C_{кб}) L_p,$$

где $L_{нр}$ - индуктивность НР;

L_p - индуктивность модели бетонного реактора;

$C_{кб}$ - емкость КБ.

При всех видах к.з, в контуре НР-КБ циркулируют токи высших гармонических, не выходящие в сеть. Так как режим к.з. обычно быстротечен, то токи высших гармонических при выборе конденсаторов не учитываются.

Установки проверялись на различное токоограничивающее действие путем изменения линейной предвключенной индуктивности (L_p) и соответствующим применением $C_{кв}$. Были получены следующие результаты: при отсутствии установки кратность тока к.з. по отношению к номинальному $n \approx II \dots I2$, при наличии установки $n = 2,0 \dots 2,2$. В номинальном режиме обеспечивалась минимальная потеря напряжения в сети.

Исследования физических моделей показали, что при несимметричном к.з. в переходных режимах появляются апериодические резонансные явления. Такие явления наблюдаются при настройке ТУ в резонанс на одну из нечетных гармоник, например, третью, тогда $3\omega L_p = \frac{1}{3\omega C_{кв}}$. Однако такое соотношение не характерно для нормальной работы ТУ.

На фиг. 3 приведены осциллограммы токов и напряжений трехфазного к.з. при наличии и отсутствии ТУ. Из осциллограммы видно, что ток в сети практически синусоидален, а длительность переходного процесса при к.з. не превышает одного полупериода.

Заключение

Резонансное токоограничивающее устройство (РТУ) на базе насыщающегося реактора (НР) с вращающимся магнитным полем (ВМП) эффективно и практически безынерционно ограничивает сверхтоки при различных видах к.з. Соответствующим выбором элементов РТУ можно обеспечить любой заданный уровень токов к.з. При несимметричных видах к.з. все фазы переходят в режим токоограничения. Это объясняется симметрией магнитопровода НР с ВМП и тем, что он является общим для всех трех фаз.

В рабочем режиме РТУ действует как установка продольно-емкостной компенсации.

Для того, чтобы устойчивая рабочая точка не располагалась на падающей части характеристики РТУ и для предотвращения возникновения феррорезонанса необходимо увеличение сопротивления линейного элемента, т.е. в данном случае увеличить активное сопротивление в цепи НР.

Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность РТУ на базе НР с ВМП и пригодность предложенных расчетных методик элементов РТУ для инженерных расчетов.

В качестве области применения установки можно рекомендовать:

- 1 - секционирование шин собственных нужд ТЭС и АЭС;
- 2 - секционирование радиальных сетей сельского и промышленного назначения;
- 3 - для уменьшения колебаний напряжения в сетях промышленных предприятий при наличии резкопеременной нагрузки при одновременном уменьшении токов к.з.;
- 4 - для ограничения токов к.з. в компенсированном преобразователе напряжений.

Приложение I

Пусть имеется участок сети (см. фиг. I, б), где в узлах А и В имеются отпайки к потребителям. В нормальном режиме требуется улучшить напряжение в узле В. Этот же узел прием точкой к.з. Расчет выполняем в относительных величинах.

Задано, что $x_c = 0,1$ ($b_c = 10$), $\cos \varphi_B = 0,8$, $U_A = 1,0$; $I_{B \text{ макс}} = 1,0$. Напряжение в узле В при отсутствии установки $U_B = U_A - I_{B \text{ макс}} \sin \varphi_B x_c = 1 - 1 \cdot 0,6 \cdot 0,1 = 0,94$.

При к.з. в узле В $I_{кз} = 1,0 \cdot 10 = 10$. Напряжение в узле А понижается в зависимости от предвключенного сопротивления сети.

При наличии установки с параметрами $X_D = 0,1$; $\Delta U_{рном} = 0,2$; $I_{рном} = 0,2$; $b_{кв} = -1 \cdot 5 = -6$, тогда $U_B = 1,0 - 1,0 \cdot 0,6 (0,1 + 0,1 - 0,2) = 1,0$;

$$I_{кз} = 1 - 0,27/0,1 + 0,1 + 0,0715 = 2,68;$$

$$\Delta U_{расч} = 0,2 \cdot 20 - 0,2/20 \cdot 6 = 0,27;$$

$$\Delta X_{расч} = \frac{1}{20 - 6} = 0,0715;$$

$$\Delta U_y = 0,2 \cdot 20 + (2,68 - 0,2)/20 \cdot 6 = 0,462;$$

$$I_{НР} = 0,2 + (0,462 - 0,2) \cdot 20 = 5,44.$$

При заданной геометрии магнитопровода требуется рассчитать электромагнитные характеристики НР. Расчетные коэффициенты выбраны на основе опыта проектирования управляемых реакторов.

Пусть $\tau = 56,6$ см; $L_i \approx 0,64$; $B_{\Sigma} = 0,7$ Т; $\beta = 0,8$; $\Phi_{1m} = 0,64 \cdot 0,7 \cdot 0,566^2 / 0,8 = 0,18$ Вб. При включении реактора с конденсаторами на $U_{\text{раб}} = 0,66$ кВ; $\Delta U_{\text{рном}} = 0,66$ кВ; $Z = 36$; $a = 2$,

$$S_n = \frac{(0,66 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2)}{222 \cdot 0,925 \cdot 0,18 \cdot 36} = 6 \text{ при } I_{\text{н макс}} = 160 \text{ А,}$$

$$\Lambda_1 = 0,09; \Lambda_2 = 0,5; \Delta = \frac{6 \cdot 0,2 \cdot 160 \cdot 36}{0,09 \cdot 0,5 \cdot 0,18 \cdot 2 \cdot 56,6^2 \cdot 10^2} =$$

$= 1,33 \text{ А/мм}^2$. В предыдущем примере получили $I_{\text{нр}} = 5,44$;

$$\Delta_{\text{кз}} = \frac{I_{\text{нр}}}{I_{\text{рном}} \Delta} = \frac{5,44}{0,2 \cdot 1,33} = 35,6 \text{ А/мм}^2. \text{ Таким обра-}$$

зом, $\Delta = 1,33 \text{ А/мм}^2 < \Delta_{\text{дон}} = 2 \text{ А/мм}^2$. При воздушном естественном охлаждении без вентиляции $\Delta_{\text{кз}} = 35,6 \text{ А/мм}^2$ — тоже в допустимых пределах. При расчете вольт-амперной характеристики при номинальном напряжении реактора $\Delta U_{\text{рном}} =$

$$= 0,66 \text{ кВ ток реактора равен } I_{\text{рном}} = 24,6 \text{ А, т.е. } \frac{24,6 \cdot 100}{160} =$$

$$= 15,3 \%. \text{ Высота внутреннего ярма } h_{\text{я}} = \frac{0,18}{2 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 10^2} =$$

$= 9,5$ см (сталь Э41). $l = 0,7$ м. Потери в реакторе, определенные по методике [8], составляют 3,8 % $S_{\text{прох}}$. Расчетная мощность на один полюс $\frac{S_{\text{расч}}}{2p} = 30,5$ кВА при про-

ходной мощности $\frac{S_{\text{прох}}}{2} = 24,4$ кВА.

Л и т е р а т у р а

1. В е с к е р Н. Erste Begrenzungskupplung für ein industrielles Mittelspannungsnetz in Betrieb. Technische Mitteilungen, AEG-Telefunken, 5, 1971.
2. D r e s c h e r В. Einrichtung zur Strombegrenzung in Wechselstromnetzen. Bulletin SEV, 2, 1972.
3. Н е к л е н а е в Б.Н. и др. Расчет, выполнение и исследование режимов работы трехфазного БТУ. Труды МЭИ "Электрические станции", вып. 162, М., 1973.
4. T h a n a w a l a Н.Л., Y o u n g D.I. Some Recent Applications in Power Systems. Energy International, November, 1970, No 7, No 11.
5. К у ч у м о в Л.А., Ч е р н о в е ц А.К., О р л о в В.С., Л и б к и н д М.С., Я р в и к Я.Я. Регулирование напряжения в сетях при помощи статического компенсатора с параметрическим регулированием. "Электричество", 1973.
6. Ц в е т к о в В.А. Расчет вольт-амперной характеристики реактора в несимметричном режиме. Известия АН СССР, "Электроэнергетика", вып. 2, 1960.
7. Проектирование электрических машин, под общей редакцией П.С. Сергеева. "Энергия", М., 1969.
8. Л и б к и н д М.С., Ч е р н о в е ц А.К. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем. "Энергия", М., 1971.
9. О р л о в В.С., Я р в и к Я.Я. Статический компенсатор реактивной мощности с регулирующим звеном на базе сдвоенного и насыщаемого реакторов. См. наст. сб., с. 39.

Resonanzbegrenzer des Kurzschlußstroms auf der
Basis der gesättigten Drosselspule mit rotierendem
Magnetfeld

Zusammenfassung

Es wird das Arbeitsprinzip des Resonanzbegrenzers erklärt und die mathematischen Gleichungen für die Auswahl und Berechnung der Begrenzerelemente angeführt.

Die experimentellen Untersuchungen haben die Funktionsfähigkeit der Anlage im symmetrischen und unsymmetrischen Betrieb gezeigt.

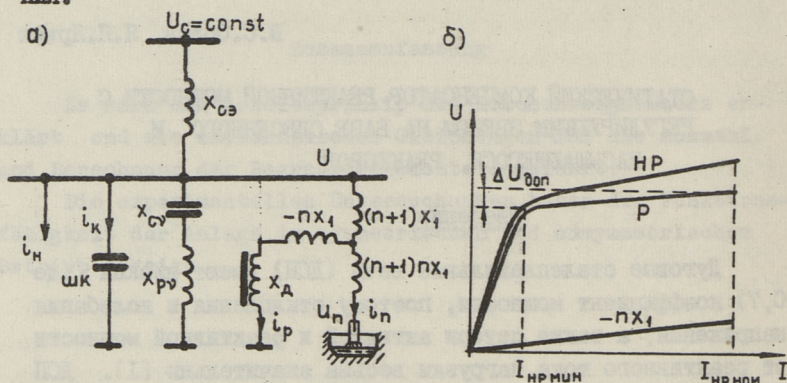
В.С.Орлов, Я.Я.Ярвик

СТАТИЧЕСКИЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С
РЕГУЛИРУЮЩИМ ЗВЕНОМ НА БАЗЕ СДВОЕННОГО И
НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ РЕАКТОРОВВведение

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) имеют низкий (до 0,7) коэффициент мощности, поэтому отклонения и колебания напряжения, а также потери активной и реактивной мощности от реактивного тока нагрузки весьма значительны [1]. ДСП создают также искажения синусоидальной формы и несимметрию фаз питающего напряжения, что приводит к дополнительному увеличению потерь и повышению аварийности электрооборудования, питающегося от общей с ДСП сети. Борьба с перечисленными неблагоприятными явлениями имеет большое практическое значение. Поэтому исследования многофункциональных установок, позволяющих комплексно улучшить качество питающего напряжения и уменьшить потери электроэнергии в электрических сетях, питающие ДСП, актуальны.

К многофункциональным фильтрокомпенсирующим установкам относится статический компенсатор реактивной мощности (СК), краткое описание которого приведен в [2]. Эквивалентная схема замещения СК и вольт-амперные характеристики его элементов приведены на фиг. 1, а и б. Дуговая сталеплавильная печь подключена к шинам понижающей подстанции через сквозное индуктивное сопротивление сдвоенного реактора, у которого индуктивности ветвей соответственно равны X_1 и X_2 , $X_2/X_1 = n$. В нулевую точку сдвоенного реактора включен насыщающийся реактор (НР), вольт-амперная характеристика которого качественно повторяет кривую намагничивания электротехнической стали [5], и имеет в области насыщения динамическое индуктивное сопротивление X_D . Ста-

близизирующее звено, состоящее из НР и сдвоенного реактора, обеспечивает уменьшение колебаний напряжения и несимметрии напряжения на шинах подстанции, к которым подключены шунтовые конденсаторы (ШК) и силовые резонансные фильтры $L - C$ для подавления высших гармонических питающего напряжения.



Фиг. 1. Эквивалентная схема замещения СК (а) и вольт-амперные характеристики регулирующего звена (б).

Из эквивалентной схемы замещения и вольт-амперной характеристик СК видно, что при соблюдении условия $X_D = -nX_1$ ДСП оказывается подключенной к точке сети с напряжением $U = \text{const}$. Симметрирование напряжения на шинах U объясняется различной добавкой напряжения, равной

$$X_1(n+1)I_n,$$

где I_n - ток в печи. Сдвоенный реактор в цепи ДСП представляет собой регулятор тока, поэтому при реальном диапазоне параметрического регулирования НР в диапазоне токов

$I_{НР} \geq I_{НР\text{ мин}}$ установка эквивалентна стабилизатору напряжения, а при $I_{НР} < I_{НР\text{ мин}}$ установка эквивалентна стабилизатору тока. Этим объясняется большая эффективность установки по стабилизации напряжения на шинах подстанции.

Целью данной работы является нахождение аналитических выражений для определения параметров фильтрокомпенсирующей установки на базе сдвоенного и насыщаемого реакторов и приближенное определение их некоторых экономических показателей.

Определение напряжения на шинах подстанции
и ДСП при наличии СК

Для определения колебаний напряжения на шинах подстанции при наличии СК составим систему линейных уравнений, описывающих приращение в элементах сети и установки в предположении, что в стационарном режиме $I_{нр} \geq I_{нр\text{мин}}$.

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_n + \Delta i_k + \Delta i_p + \Delta i_n &= \Delta i_c; \\ \Delta i_n &= b_{нА} \Delta U; \quad \Delta i_k = -b_k \Delta U; \\ \Delta i_c &= -b_{сэ} \Delta U; \\ \Delta i_p &= \frac{\Delta U}{x_A + x_1} - \frac{x_1(n+1)}{x_A + x_1} \Delta i_n, \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где обозначение Δi соответствует приращению реактивных токов в элементах сети и установки; ΔU — приращение напряжения на шинах подстанции; b_k — реактивная проводимость шунтовых конденсаторов; $b_{сэ} = \frac{1}{x_{сэ}}$ — реактивная проводимость в цепи связи шин U с шинами бесконечной мощности $U_c = \text{const}$; $b_{нА} = \Delta i_n / \Delta U$ — динамическая проводимость включенной на шины U средней составляющей реактивной нагрузки.

Решив уравнение (I) относительно ΔU , получим:

$$-\Delta U = \Delta i_n x_{\text{расч}}, \quad (2)$$

где

$$x_{\text{расч}} = \frac{x_A - nx_1}{(b_{сэ} + b_{нА} - b_{кб})(x_A + x_1) + 1}. \quad (3)$$

Для определения размаха колебаний напряжения у ДСП решим совместно последнее уравнение системой (I)

$$\Delta i_p (x_A - nx_1) + x_1(n+1)n \Delta i_n = -\Delta U_n. \quad (4)$$

Тогда с учетом (2) получим

$$-\Delta U_n = \Delta i_n \left[x_1(n+1)n - \left(\frac{x_{\text{расч}}}{x_A + x_1} + \frac{x_1(n+1)}{x_A + x_1} \right) (x_A + nx_1) \right]. \quad (5)$$

Как показано в [I] в стационарном режиме $\Delta i_n = \Delta I_{\text{расч}}$ с вероятностью не ниже 95 % не превышает величины

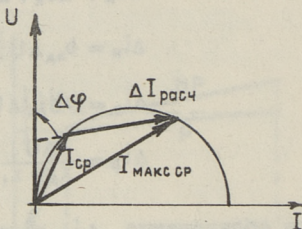
$I_{\text{тр.н}} \sin \Delta \varphi$ (фиг.2). Здесь $I_{\text{тр.н}}$ — номинальный ток печного трансформатора; $\Delta \varphi$ — угол между напряжением и токсом $\Delta I_{\text{расч}}$ на шинах печи. Для определения расчетного значения $X_{\text{расч}}$ необходимо в уравнении (2) подставить значения $\Delta I_{\text{расч}}$ и $\Delta U_{\text{доп}}$, тогда

$$X_{\text{расч}} = \left| \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{\Delta I_{\text{расч}}} \right|. \quad (6)$$

Максимального значения реактивный ток достигает в режиме эксплуатационного короткого замыкания (ЭКЗ), который по отношению к номинальному току печного трансформатора составляет $I_{\text{экз}} = 2 \dots 3 I_{\text{тр.н}}$ [1]. Представляет практический интерес определить отклонение напряжения на шинах подстанции в этом режиме. При возникновении короткого замыкания часть тока, равная $\Delta I_{\text{нр}}$, будет скомпенсирована регулирующим звеном, а дальнейшее увеличение тока будет ограничено общим сопротивлением, равным $x_{\text{сэ}} + x_1(n+1)$. С учетом этого можно записать выражение, определяющее величину отклонения напряжения на шинах подстанции в режиме короткого замыкания.

$$\Delta U_{\text{экз}} = (I_{\text{экз}} - \Delta I_{\text{нр}}) \frac{x_{\text{сэ}}^2}{x_{\text{сэ}} + x_1(n+1)} + \Delta U_{\text{доп}}. \quad (7)$$

Как видно из (7), $\Delta U_{\text{экз}} > \Delta U_{\text{доп}}$, однако частота возникновения режимов короткого замыкания значительно меньше частоты колебаний напряжения в стационарном режиме. Поэтому такие превышения колебаний напряжения $\Delta U_{\text{экз}}$ сверх допустимых не оказывают в целом сильного действия на качество напряжения. Для определения $X_{\text{расч}}$ в соответствии с уравнением (6) необходимо определить требуемые параметры НР и сдвоенного реактора. Поскольку динамическое реактивное сопротивление НР практически определено маркой стали сердечника и индуктивным сопротивлением рассеяния трехфазной обмотки, то выбору подлежат параметры сдвоенного реактора.



Фиг. 2.
Векторная диаграмма токов печной нагрузки.

Параметры сдвоенного реактора

Задаваясь одним из параметров сдвоенного реактора, например X_I , определим требуемое значение "n" и X_2 из уравнения (3)

$$n = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_A - x_{\text{расч}} [(b_{c3} + b_{нд} - b_k)(x_A + x_1) + 1]}{x_1}. \quad (8)$$

Таким образом, при известном значении динамического индуктивного сопротивления НР X_{II} и выбранном X_I определим X_2 , при котором установка обеспечивает в стационарном режиме допустимое значение $\Delta U_{\text{дон}}$.

Конструктивно сдвоенный реактор может быть выполнен воздушным (тогда нужно учитывать реальный коэффициент связи между обмотками $k_{св}$ и вместо n подставлять $k_{св} n$) или со стальным магнитопроводом.

Мощность сдвоенного реактора, равную произведению тока на полное сквозное сопротивление реактора, определим через параметры НР. Учитывая, что $X_{II} = 0,2 \dots 0,3$ [3], имеем

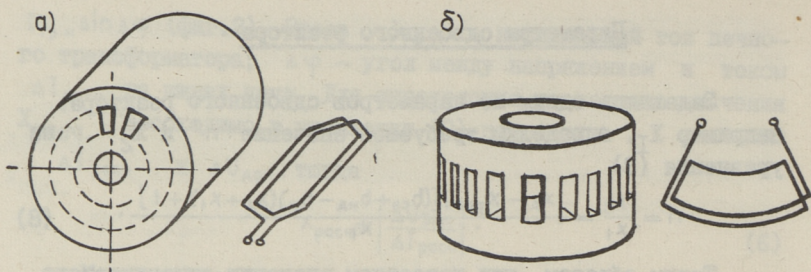
$$\begin{aligned} Q_p &\approx 3 I_3 x_1 (n+1) = 3 I_3 x_A \frac{n+1}{n}; \\ Q_p &\approx (0,6 \dots 0,9) I_3 \frac{n+1}{n}, \end{aligned} \quad (9)$$

где I_3 - эффективное значение тока печи.

Стоимость I кВА установленной мощности сдвоенного реактора со стальным сердечником и без него не превышает соответственно 1,2 и 0,6 руб.

Насыщающийся реактор

В установках, выполненных за рубежом, в качестве насыщающихся применяются реакторы стержневого типа конструкции Фридендера [2]. Однако более целесообразно применение НР с вращающимся магнитным полем. Последние имеют симметричный магнитопровод и распределенную трехфазную обмотку (см. фиг. 3, а, б). Известно [3], что они по конструкции проще, с меньшим расходом активных материалов и в симметричных режимах характер кривых тока и напряжения практически синусоидален.



Фиг. 3. Конструкция магнитопроводов и секций обмоток насыщающегося реактора с вращающимся магнитным полем с радиальным (а) и аксиальным (б) магнитным потоком.

По расчетным данным потери в насыщающемся реакторе с вращающимся магнитным полем в диапазоне мощностей 3..7 МВА не превышают 2 %, а стоимость 1 кВА установленной мощности — 2-3 руб. (на основании расчетов и изготовления опытного образца НР-150 на ГАЗе г. Горький).

Номинальный ток НР целесообразно определить через токи ДСП, $\Delta I_{расч}$ и σI — среднеквадратичное отклонение тока печи от своего среднего значения.

Связь тока насыщающегося реактора с током ДСП определяется последним уравнением системы (I) и с учетом (2) переписывается в следующем виде:

$$|-\Delta i_p| = B |\Delta i_n|;$$

$$B = \frac{x_{расч}}{x_d + x_1} \frac{x_1(n+1)}{x_d + x_1}.$$

Тогда среднее значение тока НР и его среднеквадратичное отклонение определяется из выражений

$$I_{НР.СР} = I_{НР.МИН} + B \Delta I_{расч}; \quad (I0)$$

$$\sigma I_{НР} = B \sigma I. \quad (II)$$

Номинальное значение тока НР, равное его эффективному, определится по выражению

$$I_{НР.НОМ} = \sqrt{I_{НР.СР}^2 + \sigma^2 I_{НР}^2}. \quad (I2)$$

Подставляя (I0) в (II) и в (I2), принимая $I_{НР.МИН} = a I_{НР.НОМ}$ и решая квадратичное уравнение, получим

$$I_{НР.НОМ} = \frac{a}{1-a^2} B \Delta I_{расч} + \frac{1}{1-a^2} \sqrt{B^2 \Delta I_{расч}^2 - (1+a^2) \sigma^2 I}, \quad (I3)$$

где $\Delta I_{расч} = I_{МАКС.СР} - I_{СР}$ — среднестатистический размах колебаний тока печи.

Максимальное значение тока НР равно

$$I_{\text{НР макс}} = I_{\text{НР мин}} + B \Delta I_{\text{макс}}, \quad (I4)$$

где $\Delta I_{\text{макс}} = I_{\text{макс ср}} - I_{\text{мин}}$ — максимально возможный среднестатистический размах колебаний тока печи.

Коэффициент перегрузки НР по току определится как отношение максимального к его номинальному току. Перегрузочная способность насыщающегося реактора с вращающимся магнитным полем приближенно равна перегрузочной способности трансформатора с аналогичной системой охлаждения.

Выбор мощности шунтовых конденсаторов

Номинальный ток шунтовых конденсаторов $I_{\text{шк.н}}$ с учетом реактивной нагрузки подключенной к шинам подстанции спокойной нагрузки определим по выражению

$$I_{\text{шк.н}} = (I_{\text{ср}} + I_{\text{НР.ср}} + I_{\text{н}}) K_{\varphi} = I_{\text{ср}} K_{\varphi}, \quad (I5)$$

$$K_{\varphi} = \left(1 - \frac{\text{tg } \varphi_{\text{ТРЕБ}}}{\text{tg } \varphi}\right), \quad (I6)$$

где $I_{\text{с.ср}}$ — средний реактивный ток сети;
 $\text{tg } \varphi$ и $\text{tg } \varphi_{\text{ТРЕБ}}$ — действительное и экономически выгодное значение тангенса угла между током и напряжением сети.

Стоимость 1 кВА конденсаторной мощности в сети 6–10 кВ с учетом монтажа конденсаторов составляет 5–6 руб. [1]. Из схемы компенсатора видно, что его стоимость зависит от долевого участия конденсаторов в установке. Поэтому целесообразно определить оптимальное значение K_{φ} — коэффициента компенсации реактивного тока, или, что то же самое, определить экономически выгодное значение $\text{tg } \varphi_{\text{э}}$. Оптимальным можно считать такое значение K_{φ} , при котором будет обеспечен максимальный экономический эффект от снижения потерь активной мощности.

При компенсации реактивного тока снижение потерь составит

$$\Delta P = 3 I_{\text{с.ср}}^2 K_{\varphi}^2 (1 - K_{\text{комп}})^2 R_{\text{сэ}}, \quad (I7)$$

где $R_{сэ}$ — эквивалентное активное сопротивление сети;

$K_{фс} = \frac{I_{сэ}}{I_{ссп}}$ — коэффициент формы тока сети, определяемый отношением эффективного тока к среднему, который при наличии регулирующего звена не превышает значения $1,05 \dots 1,1$.

Затраты, связанные с потерей электроэнергии, равны

$$\Delta Z_1 = \Delta P T_{г} Z_{уэ}, \quad (18)$$

где $T_{г}$ — число часов работы печи в году;

$Z_{уэ}$ — стоимость 1 кВт.ч электроэнергии.

Дополнительные затраты ΔZ_2 , связанные с установкой конденсаторов, равны

$$\Delta Z_2 = \sqrt{3} U_{ср} T_{ссп} K_{ф} T_{г} Z_{ук}, \quad (19)$$

где $U_{ср}$ — среднее расчетное напряжение;

$Z_{ук}$ — стоимость 1 кВАр конденсаторов.

Годовой экономический эффект будет определяться разностью затрат ΔZ_1 и ΔZ_2 , а максимальный экономический эффект определим приравняв нулю производную $\frac{d(\Delta Z_1 - \Delta Z_2)}{dK_{ф}}$.

Тогда экономически выгодное значение $K_{ф}$ равно

$$K_{ф} = 1 - 0,29 \left(\frac{Z_{ук}}{Z_{чк}} \right) \frac{U_{ср}}{I_{ссп} K_{фс}^2 R_{сэ}}. \quad (20)$$

Силовые резонансные фильтры

Фильтры высших гармоник должны обладать рядом необходимых качеств, которые определяют их технико-экономические характеристики. К таким основным характеристикам относятся разрешающая способность фильтра, обеспечивающая допустимую амплитуду ν -ой гармоники ($U_{\nu} \leq U_{\nu доп}$), которая зависит от эквивалентной добротности фильтра ($q_{э\nu}$), и относительной его расстройки (α). [4]

$$U_{\nu} = I_{\nu расч} \sqrt{R_{\phi\nu}^2 + \Delta X_{\nu}^2} \leq U_{\nu доп}; \quad (21)$$

$$q_{э\nu} = \frac{X_{р\nu}}{R_{\phi\nu}} = \frac{X_{к\nu}}{R_{\phi\nu}}; \quad (22)$$

$$\alpha = \frac{\Delta X_{\nu}}{\sqrt{X_{PH}}} \frac{\Delta X_{\nu}}{X_{KH}/\sqrt{\nu}}, \quad (23)$$

где X_{PV}, X_{KV}, X_{PH} и X_{KH} — действительные и номинальные реактивные сопротивления реактора и конденсаторов фильтрового устройства;

$R_{\phi\nu}$ — активное сопротивление всей цепи фильтра на ν -ой гармонике;

ΔX_{ν} — реактивное сопротивление фильтра ν -ой гармоники на частоте этой гармоники, обусловленное его возможной расстройкой;

$I_{\nu, \text{расч}}$ — расчетный ток ν -ой гармоники.

Для выполнения (21) необходимо, чтобы цепочка фильтра имела по возможности минимальное значение $R_{\phi\nu}$ и ΔX_{ν} . Величина $R_{\phi\nu}$ является конструктивной величиной, в то время как ΔX_{ν} определяется несколькими факторами: отклонением емкости и индуктивности от номинальной, зависимостью параметров от температуры, отклонением частоты и др.

При использовании в схемах силовых фильтров воздушных реакторов величина α может находиться в пределах (-30 %.. +10 %). Такая величина разброса параметров неприемлема, поэтому предлагается использовать в качестве индуктивностей подстраиваемые реакторы, управляемые подмагничиванием, или плунжерные. Очевидно, более перспективными для силовых фильтров являются плунжерные реакторы, так как они не имеют потерь на подмагничивание и, по-видимому, имеют более высокую надежность.

Каждая цепочка фильтра на основной частоте генерирует реактивную мощность, поэтому при определенном значении количества цепочек реактивная мощность шунтовых конденсаторов составит

$$Q'_{шк} = Q_{шк} - \sum Q_{\nu}, \quad (24)$$

где $Q'_{шк}$ — мощность шунтовых конденсаторов с учетом суммарной мощности фильтров на основной частоте;

$Q_{шк} = \sqrt{3} U_{CP} I_{ССР} K_{\phi C} K_{\phi \Phi}$ — мощность шунтовых конденсаторов при отсутствии фильтров.

Как показано в [4] из условия минимума затрат на генерацию реактивной мощности, получаемой при помощи совокупности шунтовых конденсаторов и силовых фильтров, целесообразно

но выбрать минимально допустимую по техническим условиям ($U_{\gamma} \leq U_{\gamma \text{ доп}}$) мощность фильтров, а недостающую реактивную мощность получать за счет отдельных конденсаторов.

Капитальные вложения на СК по сравнению с синхронными компенсаторами

Для компенсации реактивной мощности печей в проектах систем электроснабжения предлагается применять синхронные компенсаторы (Сик). Номинальный ток Сик в зависимости от параметров тока нагрузки определяются по выражению

$$I_{\text{Сик.н.}} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{\Delta U}\right)^2 \sigma^2 I + K_{\varphi}^2 I_{\text{ССР}}^2} \quad (25)$$

Тогда сравнение Сик и СК по капитальным затратам можно производить по формуле

$$\frac{K_{\text{СК}}}{K_{\text{Сик}}} = \frac{1,075 Q_{\text{НР}} K_{\text{УНР}} + Q_{\text{ШК}} K_{\text{УШК}}}{S_{\text{Сик}} K_{\text{УСик}}} \quad (26)$$

где $Q_{\text{НР}}$, $Q_{\text{ШК}}$, $S_{\text{Сик}}$ — требуемая мощность НР, ШК и Сик;
 $K_{\text{УНР}}$, $K_{\text{УШК}}$, $K_{\text{УСик}}$ — стоимость 1 кВА установленной мощности соответственно НР, ШК, Сик;
 1,075 — численный коэффициент, учитывающий стоимость двоянного реактора в схеме стабилизирующего звена.

Сделаем некоторое преобразование (26), введя безразмерные величины (коэффициенты) $\sigma = K_{\text{УНР}} / K_{\text{УШК}}$; $\delta = K_{\text{УСик}} / K_{\text{УШК}}$, тогда

$$\frac{K_{\text{СК}}}{K_{\text{Сик}}} = \frac{1,075 Q_{\text{НР}}}{S_{\text{Сик}}} \cdot \frac{\sigma}{\delta} + \frac{Q_{\text{ШК}}}{S_{\text{Сик}}} \cdot \frac{1}{\delta} \quad (27)$$

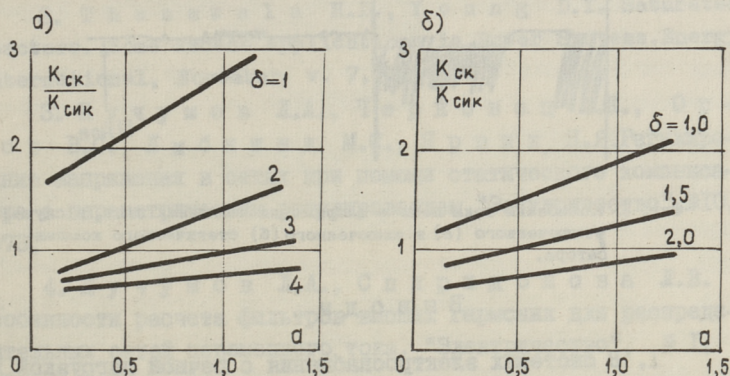
В относительных величинах $Q_{\text{НР}} = I_{\text{НР.ном}}$; $Q_{\text{ШК}} = I_{\text{ШК.ном}}$, $S_{\text{Сик}} = I_{\text{Сик.ном}}$ значение которых определим по уравнениям (13), (15) и (25). Параметры печной нагрузки также выражаем в относительных величинах [I].

$$I_{\text{макс.ср}} = K_{\text{ЭКЗ}} / 2; \quad \sigma I = K_{\text{ЭКЗ}} / 6; \quad I_{\text{ср}} = \sqrt{1 - K_{\text{ЭКЗ}}^2 / 36},$$

где $K_{\text{ЭКЗ}}$ — кратность тока эксплуатационного короткого замыкания, который зависит от мощностей печи и печного трансформатора.

На фиг. 4, а, б приведены графические иллюстрации отношения капитальных затрат Сик и СК в зависимости от пара-

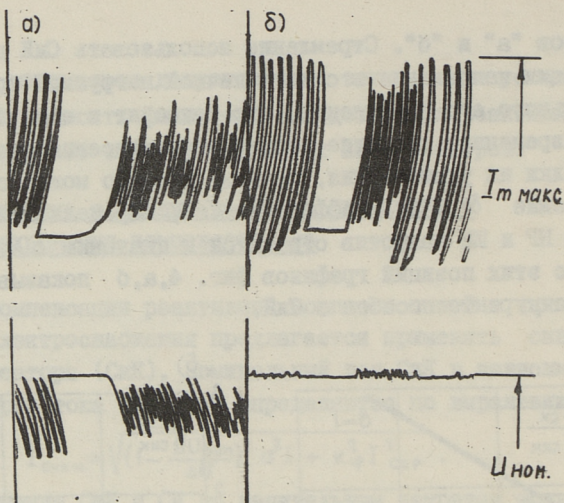
метров "а" и "б". Стремление использовать СиК для стабилизации напряжения в сети с печной нагрузкой требует специального его исполнения, что приводит к его удорожанию. Одновременное развитие конденсаторостроения создаст предпосылки их удешевления, поэтому реально можно считать, что значение $\delta \geq 2$. Коэффициент "а", определяемый стоимостью НР и ШК напротив стремится к значению $a \approx 0,5$. Анализ с этих позиций графиков фиг. 4, а, б показывает, что СК конкурентоспособен с СиК.



Фиг. 4. Отношение капитальных затрат статического и синхронного компенсатора для печей средней (а) и большой (б) мощности.

Кроме того необходимо отметить, что в реальных условиях СК обеспечивает более высокую степень стабилизации по сравнению с СиК, а в совокупности с резонансными фильтрами и уменьшение доли высших гармоник в кривых тока и напряжения.

Проводимые экспериментальные исследования физических моделей СК и расчеты показывают, что регулирующее звено на базе НР и сдвоенного реактора обеспечивает снижение колебаний напряжения в 8–10 раз (фиг. 5), в то время как СиК при соизмеримой мощности с мощностью печи, снижает эти же колебания в 2–3 раза [1], а специальные, например, СиК – 10000–8 способны в 5...6 раз уменьшить колебания напряжения, но их стоимость примерно в 2 раза дороже обычных.



Фиг. 5. Колебания тока печи и напряжения на шинах п/ст. в случае отключенного (а) и включенного (б) статического компенсатора.

Выводы

1. В системах электроснабжения с печной нагрузкой для улучшения качества питающего напряжения, а также для уменьшения потерь активной и реактивной мощности могут найти применение статические компенсаторы.

2. Высокая степень стабилизации напряжения регулирующего звена компенсатора позволяет технически выгодно использовать шунтовые конденсаторы и силовые фильтры как источники реактивной мощности и компенсаторы высших гармоник.

3. Вместо стержневых насыщающихся реакторов в схеме компенсатора с успехом могут использоваться реакторы с вращающимся магнитным полем, что обеспечивает более высокую надежность и меньшую стоимость установки, ввиду отсутствия в последних компенсационных обмоток и расщепленного магнитопровода.

4. Экспериментальные исследования физических моделей компенсаторов подтвердили справедливость расчетных формул, приводимых в данной работе, а также показали устойчивость его электромагнитного режима.

5. Предварительный анализ статических компенсаторов показывает их конкурентоспособность с синхронными компенсаторами.

Л и т е р а т у р а

1. Семенский М.Я., Минеев Р.В. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения. "Энергия" М., 1975.

2. Thanawala H.L., Young D.I. Saturated Reactors. Some Recent Applications in Power Systems. Energy International, November, v. 7, 1970.

3. Кучумов Л.А., Черновец А.К., Орлов В.С., Либкинд М.С., Ярвик Я.Я. Регулирование напряжения в сетях при помощи статического компенсатора с параметрическим регулированием. "Электричество", №10, 1973.

4. Кучумов Л.А., Спиридонова Л.В. Особенности расчета фильтров высших гармоник для распределительных сетей переменного тока. "Электричество", №1, 1974.

5. Ярвик Я.Я. Характеристики мощных стабилизаторов напряжения на базе реактора с вращающимся магнитным полем. Материалы УШ научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Том 2, Томск, 1974.

Statischer Blindleistungskompensator mit dem
Regelglied auf der Basis der Zwillings- und
Sättigungsdrosselspule

Zusammenfassung

Es wird die Schaltung und Funktionsweise der Kompensators beschrieben. Man erhielt die Gleichungen für die Festlegung der Kompensatorparameter. Es werden die Ergebnisse des ökonomischen Vergleichs des Kompensators mit dem Synchronkompensator angeführt.

Die Berechnungen und die Experimente zeigen, daß der statische Kompensator die Spannungsschwankung 8 bis 10 mal abgrenzt.

УДК 621.318.43

А.П.Рейнер, Я.Я.Ярвик

ВЕКТОРНАЯ И КРУГОВАЯ ДИАГРАММА УПРАВЛЯЕМОГО И НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ РЕАКТОРА С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Введение

В литературе большое внимание уделено вопросам, связанным с параллельным включением реакторов. Имеются публикации М.С.Либкинда и А.К. Черновца, относящиеся к токоограничивающему реактору последовательного включения. Однако в этих случаях мало уделяется внимания удобным для инженерных расчетов векторным и круговым диаграммам реактора. Их использование в случае применения реактора в качестве регулятора напряжения существенно упрощает определение параметров элементов схемы.

Схема замещения

Насыщающийся реактор с вращающимся полем (НР) аналогичен асинхронному электродвигателю с неподвижным ротором, имеющим на нем разомкнутые фазовые обмотки. Поэтому кривая намагничивания реактора аналогична кривой намагничивания такого двигателя, имеющего малый воздушный зазор. Исходя из теории электрических машин уравнения насыщающегося реактора можно представить в комплексной форме в следующем виде:

$$\dot{U}_y = \dot{I}_y (r + r_m) + j \dot{I}_y x_{sy} - \dot{E}_y, \quad (I)$$

где $\dot{U}_y, \dot{I}_y, \dot{E}_y$ — действующие значения напряжения питания, тока реактора и э.д.с. индуцируемой в рабочей обмотке реактора;

r и x_{sv} - активное сопротивление и сопротивление рассеивания рабочей обмотки реактора;

r_m - сопротивление, учитывающее потери на перемагничивание стали.

Поскольку кривые токов и э.д.с. реактора близки к синусоидальному, то для упрощения расчетов можно пренебречь в большинстве случаев высшими гармоническими. Тогда уравнения примут следующий вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 (r + r_m) + j \dot{I}_1 x_{s1} - \dot{E}_1. \quad (2)$$

Величина э.д.с. определяется известной формулой:

$$\dot{E}_1 = 4,44 w k_{\sigma s1} \dot{\Phi}_1 = 4,44 w k_{\sigma s1} \alpha_i l_c \tau B_1, \quad (3)$$

где w и $k_{\sigma s1}$ - число витков рабочей обмотки и обмоточный коэффициент для первой гармонической;

$\dot{\Phi}_1$ и B_1 - первая гармоника потока и индукции;

l_c и τ - "чистая" длина магнитопровода и полюсное деление реактора.

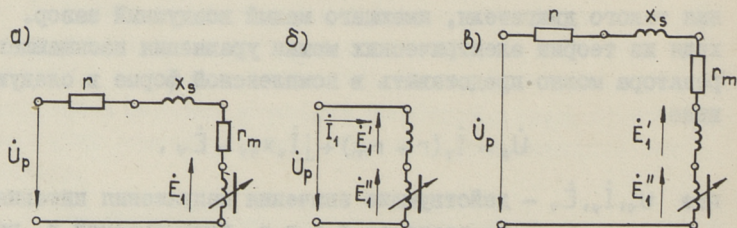
В управляемом реакторе (УР), как известно, индукцию B_I можно изменить с подмагничиванием магнитопровода реактора. Поэтому э.д.с. можно представить состоящей из двух составляющих:

E'_1 - неуправляемой части;

E''_1 - управляемой части, которую можно регулировать с подмагничиванием от 0 до номинального значения $E''_{1н}$.

Далее выражение э.д.с. примет вид:

$$E_1 = f_1(H_0) = E'_1 + E''_1 f(H_0) = E'_1 + (0 \dots E''_{1н}).$$



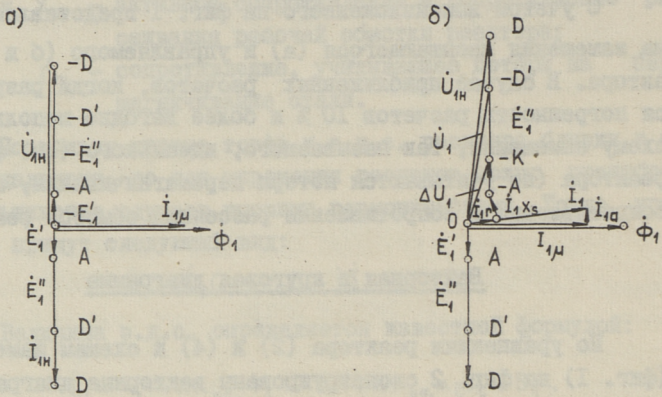
Фиг. 1. Схема замещения насыщающего реактора (а), идеального (б) и реального управляемого реактора (в).

С учетом вышесказанного на фиг. 1 представлена схема замещения насыщаемого (а) и управляемого (б и в) реактора. В случае приближенных расчетов, когда разрешаются погрешности расчетов 10 % и более выгодно использовать схему замещения, так называемого, идеального (см. фиг. 1, б) реактора (не учитываются потери перемагничивания, активные сопротивления и сопротивления рассеяния обмоток реактора).

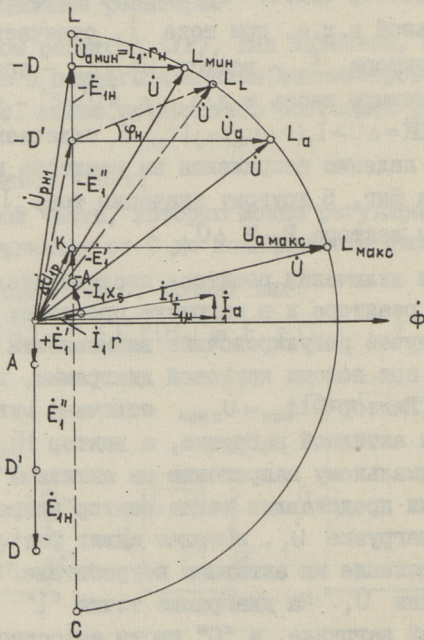
Векторная и круговая диаграмма

По уравнениям реактора (2) и (4) и схемам замещения (фиг. 1) на фиг. 2 сконструированы векторные диаграммы идеального (а) и реального управляемого (б) реактора. На векторной диаграмме представлены: $\dot{I}_{1\mu}$ — вектор намагничивающего тока, $\dot{I}_{1\sigma}$ — вектор тока, вызванный потерями на перемагничивание стали и \dot{I}_1 — потребляемый от сети ток. Вектор потока Φ_1 совпадает по фазе с током намагничивания $\dot{I}_{1\mu}$, а вектор э.д.с. \dot{E}_1 отстает по фазе на 90° от $\dot{I}_{1\mu}$. Номинальной э.д.с. при токе \dot{I}_1 отвечает вектор $\overline{OD} = \dot{E}_{1n}$. Часть вектора \dot{E}_1 — вектор $\overline{OA} = \dot{E}'_1$ — представляет из себя неуправляемую часть э.д.с., а $\overline{AD}' = \dot{E}''_1$ — управляемую часть. Вектор $\overline{OK} = \Delta \dot{U} = \dot{I}_1(r + r_m) + j \dot{I}_1 x_{s1} - \dot{E}'_1$ отвечает минимальному падению напряжения на реакторе при токе \dot{I}_1 . Как видно из фиг. 5, другому значению тока \dot{I}_1 отвечают другие величины вектора \dot{E}_1 и $\Delta \dot{U}$.

При включении реактора последовательно с нагрузкой в сеть, в реакторе и в нагрузке протекает равный ток \dot{I}_1 . В таком случае регулировочные возможности реактора легко оценить при помощи круговой диаграммы, представленной на фиг. 3. Вектор $\overline{DL}_{\min} = \dot{U}_{\min}$ отвечает минимальному напряжению на активной нагрузке, а вектор $\overline{HL}_{\max} = \dot{U}_{\max}$ отвечает максимальному напряжению на активной нагрузке. Для иллюстрации представлен также вектор напряжения на индуктивной нагрузке \dot{U}_L , имеющем сдвиг фаз φ_n и соответствующее напряжение на активном потребителе \dot{U}_σ при неизменном напряжении \dot{U}_1 . На диаграмме точка "L" отвечает чисто индуктивной нагрузке, а "C" чисто емкостной нагрузке. В случае активной нагрузки, как видно из круговой диаграммы, регулятор напряжения с реактором ухудшает коэффициент мощ-



Фиг. 2. Векторная диаграмма идеального (а) и реального (б) реактора.

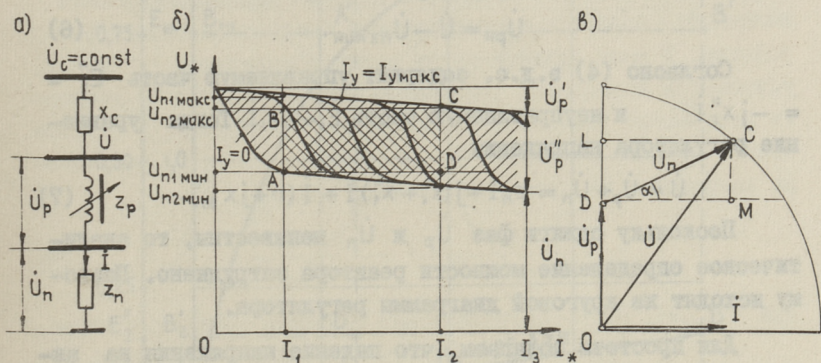


Фиг. 3. Круговая диаграмма регулятора напряжения на базе управляемого реактора.

ности сети питания (см. фиг. 3 углы φ_1 и φ_2). Применяв круговую диаграмму легко определить также параметры в заданных точках характеристики реактора последовательного включения.

Выбор диапазона регулирования и мощности реактора

При расчете реактора последовательного включения по сравнению с реактором параллельного включения ($U_p \approx const$), осложняется выбор исходных параметров и мощности реактора. Пусть реактор включен в качестве регулятора напряжения последовательно с нагрузкой (фиг. 4, а). Тогда внешняя характеристика регулятора напряжения на базе УР имеет вид, представленный на фиг. 4, б.



Фиг. 4. Схема включения (а), внешняя характеристика (б) и круговая диаграмма (в) идеализированного регулятора напряжения на базе управляемого реактора. Рабочая зона регулятора напряжения заштрихована.

Из фигуры следует, например, что при неизменном значении тока $I = I_3 = const$ за счет увеличения тока управления от $0 \dots I_{y\max}$ падение напряжения на реакторе уменьшается от $\dot{U}_p = \dot{U}'_p + \dot{U}''_p$ до $\dot{U}_p = \dot{U}'_p$ и соответственно напряжение на нагрузке увеличивается от значения \dot{U}_n до $\dot{U}_n + \dot{U}''_p$.

Таким образом, в случае неизменного напряжения питания при изменении сопротивления нагрузки за счет тока подмагничивания реактора возможно регулирование напряжения питания потребителя U_n во всем заштрихованном диапазоне (см. фиг. 4, б).

Поскольку обычно предусматривается неизменным диапазон регулирования напряжения от $U_{п\text{ мин}}$ до $U_{п\text{ макс}}$ для всех возможных значений сопротивления нагрузки $Z_{п\text{ макс}} \dots Z_{п\text{ мин}}$, то вследствие этого суживается рабочая зона регулятора до площади прямоугольника ABCD (см. фиг. 4, б). Поэтому выражение диапазона регулирования напряжения имеет вид

$$D_u = \frac{U_{п2\text{ макс}}}{U_{п1\text{ мин}}} \quad (5)$$

Обычно при проектировании регулятора напряжения заданы значения D_u , номинального тока I_H и напряжения $U_H = U_{п2\text{ макс}}$. Используя (5) и значения D_u и U_H , определяется $U_{п1\text{ мин}}$. Далее определяется величина номинального падения напряжения на реакторе

$$\dot{U}_{рн} = \dot{U} - \dot{U}_{п2\text{ мин}} \quad (6)$$

Согласно (4) э.д.с. содержит управляемую часть $\dot{E}_1'' = -jx_1'' \dot{I}$ и неуправляемую часть $\dot{E}_1' = -jx_1' \dot{I}$. Тогда уравнение регулятора напряжения

$$\dot{U} = \dot{U}_p + \dot{U}_n = z_n I + j(x_1' + x_1'') \dot{I} + \dot{I}(r + jx_{s1}) \quad (7)$$

Поскольку сдвиги фаз \dot{U}_p и \dot{U}_n неизвестны, то аналитическое определение мощности реактора затруднено. Поэтому исходят из круговой диаграммы регулятора.

Для простоты полагаем, что падение напряжения на активном сопротивлении обмоток реактора пренебрежительно мало (это справедливо при реакторах $S_p \geq 50$ кВАР), т.е. U_p — чисто индуктивное падение напряжения.

На фиг. 4, в представлена круговая диаграмма, где отрезок OD соответствует \dot{U}_p ; DC = \dot{U}_n и OC = \dot{U} ($|\dot{U}| = \text{const}$). Отсюда искомое падение напряжения на реакторе

$$U_p = \sqrt{U^2 - U_n^2 \cos^2 \alpha} - U_n \sin \alpha.$$

Учитывая, что при $I = I_{\text{мин}} = I_{1\text{ мин}}$ э.д.с. E_{1H} приближенно выражается

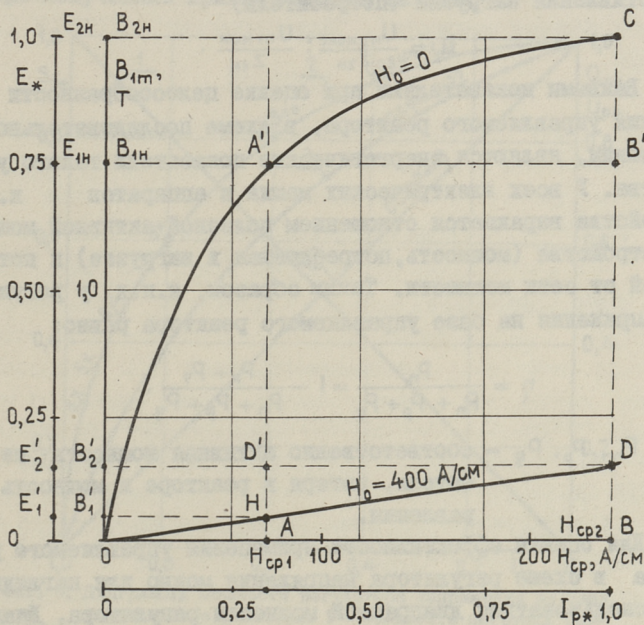
$$E_{1H} \approx U_{p1H} - \Delta U_{p1} = U_{p1H} - x_p I - x_1' I, \quad (8)$$

где x_p — индуктивное сопротивление рассеяния реактора.

Тогда далее получим

$$E_{1H} \approx \sqrt{U^2 - U_{\text{нмин}}^2 \cos^2 \alpha} - U_{1\text{мин}} \sin \alpha - x_p I - x'_1 I. \quad (9)$$

Чаще всего целесообразно при определении мощности реактора, вместо E_{1H} , полученной при минимальном токе I_1 , исходить от значения E_{2H} , найденного при номинальном токе $I_2 = I_H$. Поэтому от величины E_{1H} переходим к величине E_{2H} . Для этого воспользуемся отношением соответствующих отрезков по типовой кривой намагничивания, представленной на фиг. 5.



Фиг. 5. Типовая кривая намагничивания реактора с $D_{cp} = 180$ мм, $2p = 4$ и $\delta = 0,1$ мм.

Типовая кривая намагничивания реактора, определена по аналогии типовых кривых вольт-амперных характеристик [1].

$$E_{2H} = \frac{E_{1H}}{AA'} BC = \frac{E_{1H}}{BB'} BC.$$

Таким образом, требуемая мощность управляемого реактора равняется

$$Q_p = 3 E_{2H} I_H. \quad (10)$$

Выражение для расчета диапазона регулирования по току имеет вид:

$$D_I = \frac{U_{n2 \text{ макс.}}}{Z_2} : \frac{U_{n1 \text{ мин.}}}{Z_1} . \quad (II)$$

Здесь необходимо учесть, что обычно с изменением напряжения питания у потребителя изменяется также его сопротивление. Поэтому диапазон регулирования по току D_I зависит от величины сопротивления потребителя. Исходя из сказанного, величину D_I определяем при номинальной величине сопротивления нагрузки (потребителя)

$$D_I = \frac{U_{n2 \text{ макс.}}}{Z_{2н}} : \frac{U_{n1 \text{ мин.}}}{Z_{1н}} . \quad (I2)$$

Важными показателями при оценке целесообразности применения управляемого реактора, в схеме последовательного включения, являются энергетические показатели такого устройства. У всех электрических машин и аппаратов к.п.д. устройства выражается отношением полезной активной мощности устройства (мощность, потребляемая в нагрузке) к потребляемой от сети мощности. Таким образом, к.п.д. у регулятора напряжения на базе управляемого реактора равно:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_p + P_y} = 1 - \frac{P_p + P_y}{P_n + P_p + P_y} , \quad (I3)$$

где P_n , P_p , P_y — соответственно активная мощность потребителя, потери в реакторе и мощность управления.

Для оценки эффективности применения управляемого реактора в схеме регулятора напряжения можно для наглядности воспользоваться диаграммой мощности регулятора. Диапазон регулирования регулятора для заданного реактора зависит от характера потребителя (нагрузки). При проектировании регулятора необходимо знать зависимость требуемой мощности реактора от характера нагрузки. Для получения подобной зависимости полагаем, что имеется идеализированный реактор, т.е. реактор без потерь.

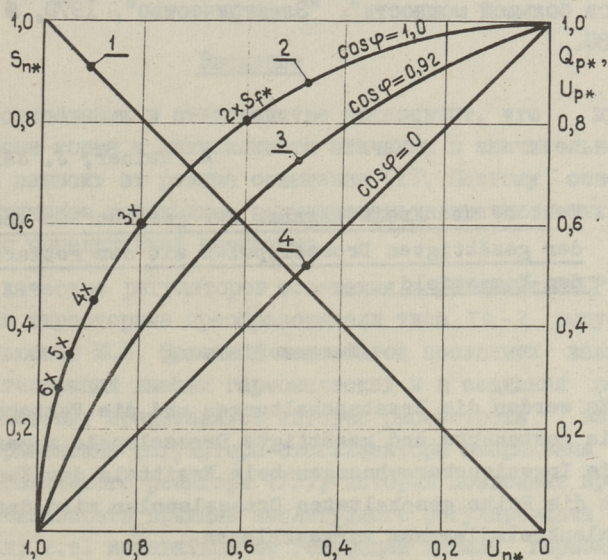
Принимая напряжение U и ток I неизменными, задавая диапазон регулирования и падение напряжения на реакторе при различном характере нагрузки, рассчитываем кривую требуемой мощности регулирования.

Выражаем мощность нагрузки (потребителя) S_n и реактора Q_p в относительных величинах:

$$S_{n*} = \frac{S_n}{S_n} = \frac{3U_n I}{3UI} = U_{n*}; \quad (I4)$$

$$Q_{p*} = \frac{Q_p}{S_n} = \frac{3U_p I}{3UI} = U_{p*}. \quad (I5)$$

Пользуясь соответствующими падениями напряжений из круговой диаграммы реактора получаем искомые значения S_{n*} и Q_{p*} . Для получения результирующего $\cos\varphi$ из круговой диаграммы, измеряем угол сдвига тока \dot{I} и напряжения \dot{U} . Теперь полученные кривые наносим на фиг. 6.



Фиг. 6. Диаграмма мощности регулятора напряжения на базе управляемого реактора. 1 - мощность нагрузки (потребителя). Требуемая мощность реактора, если коэффициент мощности нагрузки равняется: 2 - $\cos\varphi = 1,0$; 3 - $\cos\varphi = 0,92$; 4 - $\cos\varphi = 0$.

Из фиг. 6 следует, что при коэффициенте мощности нагрузки $1,00 \leq \cos\varphi \leq 0,92$ применение реактора неблагоприятно. На фиг. 6 для наиболее тяжелого случая ($\cos\varphi = 1,0$), для разных значений глубины регулирования напряжения даны требуемые кратности увеличения мощности реактора в виде целых чисел по отношению к случаю, где $\cos\varphi = 0$. При чисто индуктивной нагрузке увеличения мощности не требуется. Од-

нако требуется улучшение результирующего коэффициента мощности. При значениях $\cos \varphi = 0,9 \dots 1,0$ применение управляемого реактора в качестве регулятора напряжения нецелесообразно. При этом более выгодно применение управляемого подмагничиванием трансформатора с вращающимся магнитным полем.

Л и т е р а т у р а

И. Кучумов Л.А., Черновец А.К., Ярвик Я.Я. "Математическое моделирование управляемых реакторов большой мощности". "Электричество", 1970, № I, с.26-30.

A. Reiner, J. Järvik

Vektor- und Kreisdiagramm der gesteuerten und der gesättigten Drosselspulen mit dem rotierenden Magnetfeld

Zusammenfassung

Es werden die Ersatzschaltungen und die Vektordiagramme für die gesteuerte und gesättigte Drosselspule angeführt. Für die Ingenieurberechnungen beim Ermitteln der Kenngrößen der in die Reihe geschalteten Drosselspulen wird das Drosselspulenkreisdiagramm vorgeschlagen.

УДК 621.316.721

А.П.Рейнер, Я.Я.Ярвик

РЕГУЛЯТОР-СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ НА БАЗЕ
УПРАВЛЯЕМОГО РЕАКТОРА С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ
ПОТОКОМВведение

Исследования в птицеводстве показывают, что привес птиц кроме корма и микроклимата птичника в значительной степени зависит от режима освещения [1]. Поэтому освещенность птичника необходимо регулировать в значительных пределах по определенной программе.

В качестве регуляторов освещения в условиях ЭССР применяются тиристорные преобразователи типа TR-2 выпускаемые Харьковским МСО. Основной недостаток последних заключается в генерации высших гармонических и в создании радиопомех. Поэтому представляет интерес рассмотреть возможность применения регулятора-стабилизатора напряжения на базе управляемого реактора (УР), который позволяет практически реализовать принцип амплитудного регулирования напряжения, т.е. избавиться от генерации высших гармонических. Опыт применения УР в подобных устройствах практически отсутствует.

В настоящее время имеется относительно большой опыт проектирования и изготовления УР с радиальным магнитным потоком (см. [2] фиг. 3,а). Реактор с аксиальным магнитным потоком напротив мало изучен. Он имеет магнитопровод, аналогичный магнитопроводу торцевых двигателей (см. [2] фиг. 3,б). Специфика такого реактора коротко изложена в [3].

Цель данной работы является разработка регулятора-стабилизатора напряжения, его системы управления и накопление опыта расчета, проектирования и изготовления УР с аксиальным магнитным потоком.

Управляемый реактор

Параметры УР с аксиальным магнитным потоком рассчитаны применением круговой диаграммы (см. [5] фиг. 3). Исходными данными являются номинальный ток и заданные пределы изменения напряжения питания осветительной нагрузки ($I_{\text{фн}} = 15 \text{ A}$, $U_{\text{ф}} = 120 \dots 220 \text{ В}$). Расчет выполнен согласно [4]. Дополнительно необходимо учитывать ограничение, обусловленное вместимостью лобовых частей рабочей обмотки во внутреннем отверстии цилиндрического магнитопровода. Последний выполнен из ленточной электротехнической стали марки Э-370-0,08.

Не приводя хода расчета реактора, представим лишь основные соотношения для определения минимально допустимого диаметра отверстия ярма и длин лобовых частей трехфазной обмотки. Важно правильно выбрать расстояния между лобовыми частями отдельных катушек и расстояния до металлических частей, окружающих лобовую часть катушки. Указанные расстояния зависят от номинального напряжения УР и выбираются аналогично электрическим машинам.

Пусть имеется петлевая обмотка. На фиг. I показана нижняя половина магнитопровода реактора с трехфазной обмоткой. Изучение возможностей размещения лобовых частей показывает, что при обычном способе укладки требуется примерно на $1/3$ большая площадь внутреннего отверстия ярма, чем в случае изогнутых вниз лобовых частей (см. фиг. I, а, б, в).

Определим при заданной ширине S и высоте H катушки длины вылета лобовых частей. Согласно фиг. I вылет наружной лобовой части $l_{\text{в1}}$ содержит размер $h_{\text{в1}}$, двухкратную величину минимального радиуса изгиба (R) и $1,5H$, т.е.

$$l_{\text{в1}} = h_{\text{в1}} + 2R + 1,5H,$$

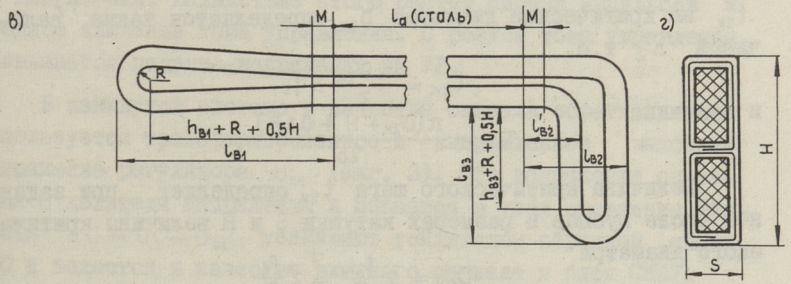
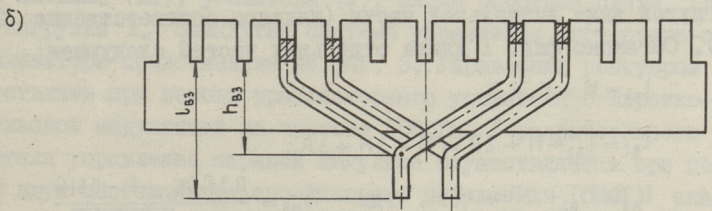
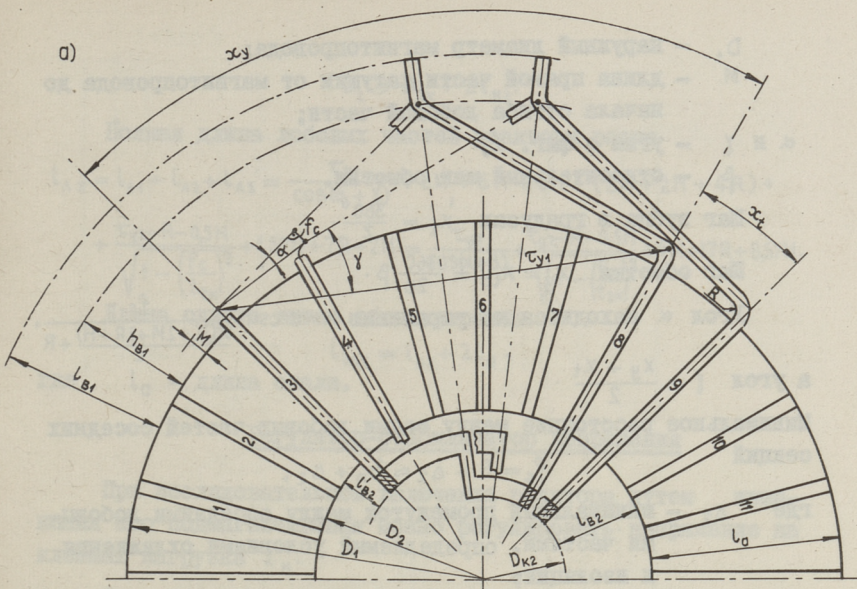
где

$$h_{\text{в1}} = \frac{\tau_{y1}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + 0,5 \tau_{y1} \operatorname{tg}(\alpha + \gamma) - \frac{D_1}{2}.$$

Шаг обмотки на уровне начала изгиба внешней части τ_{y1} равен

$$\tau_{y1} = (D_1 + 2M + 2R + H) \sin \frac{\alpha}{2},$$

где α — шаг обмотки в градусах;



Фиг. 1. Нижняя половина магнитопровода реактора с трехфазной обмоткой: а - катушка двухслойной обмотки; б - расположение внутренних лобовых частей; в - поперечное сечение катушки; г - основные размеры катушки.

D_1 - наружный диаметр магнитопровода;

M - длина прямой части катушки от магнитопровода до начала отгиба лобовой части;

α и γ - углы с фиг. I;

β - относительный шаг обмотки.

Шаг зубца в градусах $\chi_t = \frac{360^\circ}{Z}$.

Шаг обмотки $\chi_y = \chi_t \beta = \frac{360}{2p} \beta$.

Угол α находится по выражению $\alpha = \arcsin \frac{f_c}{\frac{\pi(D_1 + 2M + 2R + H)}{Z} + R}$,

а угол $\gamma = \frac{\chi_y + \chi_t}{2}$.

Минимальное расстояние между осями лобовых частей соседних секций

$$f_c = S + \Delta_2 \approx b_n + \Delta_2,$$

где Δ_2 - минимальный промежуток между соседними лобовыми частями, определяемый условиями охлаждения и изоляции;

b_n - ширина паза.

Внутренняя лобовая часть состоит из радиальной и из изогнутой вниз аксиальной части (индексы соответственно 2 и 3). Согласно фиг. I длина отдельных частей следующая:

$$l'_{B2} = M + H + R$$

и

$$l_{B2} = l'_{B2} + H + 2R = M + 2H + 3R;$$

$$l_{B3} = h_{B3} + 2R + 1,5H, \text{ где } h_{B3} = \frac{0,5 f_c (\tau_{y2} - R - 0,5H)}{t_{2k} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{t_{2k}}\right)^2}}.$$

В последнем выражении критический шаг ближайших катушек t_{2k} на критическом диаметре D_{2k} определяется также величиной Δ_2 т.е.

$$t_{2k} = \frac{\pi D_{2k}}{Z} \geq f_c$$

и величина

$$\tau_{y2} = \frac{\pi(D_{2k} + H + 0,5R)}{2p} \beta.$$

Величина критического шага t_{2k} определяет при заданном числе зубцов и размерах катушки S и H величины критического диаметра

$$D_{2k} = Z \frac{t_{2k}}{\pi} = Z \frac{f_c}{\pi}$$

и минимального возможного диаметра внутреннего отверстия магнитопровода реактора

$$D_2 \geq D_{2K} + 2l_{B2}$$

Полная длина лобовых частей реактора равна

$$l_{\Lambda Z} = l_{\Lambda 1} + l_{\Lambda 2} + l_{\Lambda 3} = \frac{\tau_{y1}}{\cos(\alpha + \gamma)} + 2M + 6R + 3H + (2M + 2H + 4R) + \\ + \frac{\tau_{y2} - R - 0,5H}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{t_{2K}}\right)^2}} + 1,57H + 7R + 2H = \frac{\tau_{y1}}{\cos(\alpha + \beta)} + \frac{\tau_{y2} - R - 0,5H}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{t_{2K}}\right)^2}} + 4M + 17R + 8,57H.$$

Длина одного витка обмотки равна

$$l_{\text{внт}} = l_{\Lambda 2} + 2l_{\sigma},$$

где l_{σ} — длина стали.

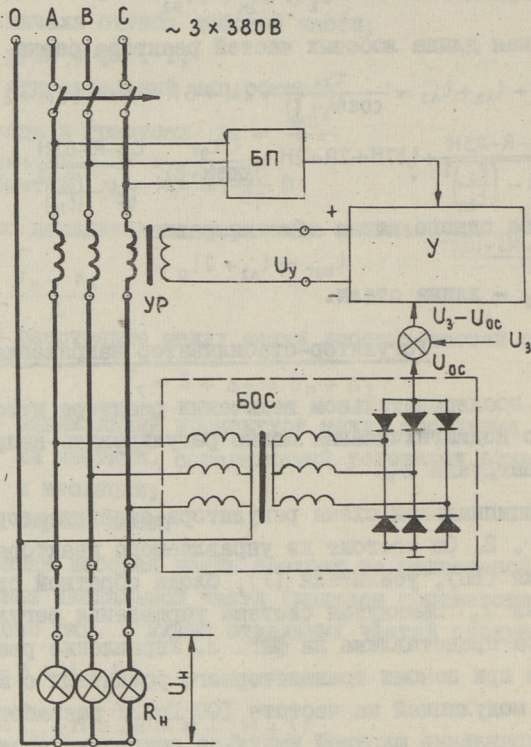
Регулятор—стабилизатор напряжения

При последовательном включении реактора путем изменения его подмагничивания можно регулировать напряжение на клеммах нагрузки Z_H .

Принципиальная схема регулятора—стабилизатора приведена на фиг. 2. Он состоит из управляемого реактора (УР), блока питания (БП), усилителя (У), блока обратной связи (БОС) и нагрузки Z_H . Замкнутая система управления регулятора—стабилизатора представлена на фиг. 3. Управление реактором осуществляем при помощи транзисторного усилителя с широтно-импульсной модуляцией на частоте 100 Гц. У разработанного усилителя управление шириной импульса осуществляется при помощи двух систем импульсно-фазового управления (СИФУ) аналогично тиристорному преобразователю. Увеличением напряжения U_1 смещается начальный уровень формируемого пилообразного напряжения. Вследствие этого растет ширина импульсов и среднее значение тока управления. С ростом тока управления уменьшается падение напряжения на УР.

В замкнутой системе в качестве сигнала обратной связи используется трансформированное и выпрямленное выходное напряжение регулятора U_{oc} (фиг. 3). Это напряжение снимается с делителя напряжения и подается в узел сравнения. Разность $\Delta U = U_3 - U_{oc}$ усиливает усилителем обратной связи УОС и подается в качестве входного сигнала в блок СИФУ.

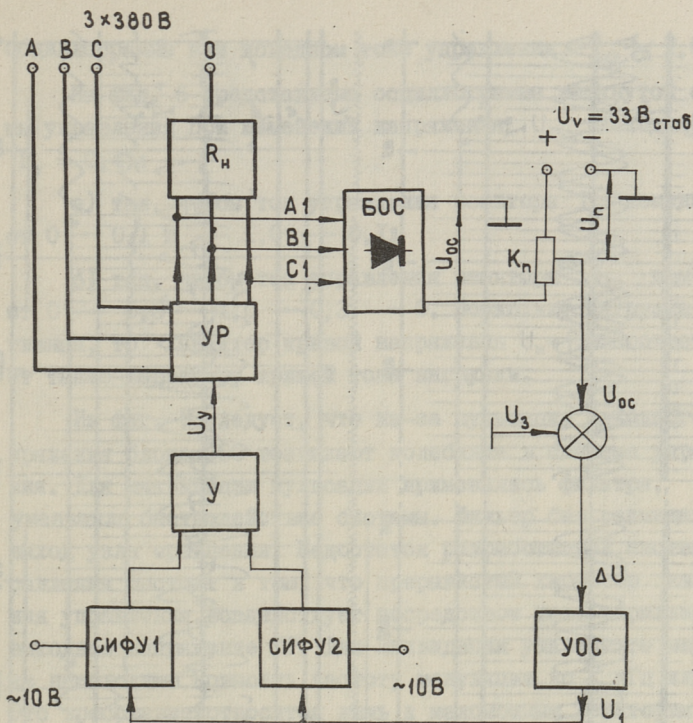
На фиг. 4 представлены экспериментальные вольт-амперные характеристики регулятора—стабилизатора напряжения (РСН), снабженного разомкнутой (а) и замкнутой (б) системой управ-



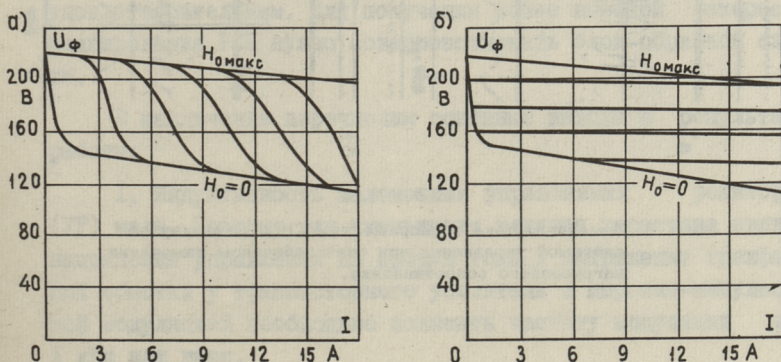
Фиг. 2. Принципиальная схема регулятора-стабилизатора напряжения на базе УР: БП - блок питания; У - усилитель; БОС - блок обратной связи; УР - управляемый реактор; Z_n и U_n - нагрузочное сопротивление и напряжение на нем; U_{oc} , U_3 и U_y - напряжение обратной связи, задания и управления реактора.

ления. Как следует из фигуры, регулировочные характеристики РСН хороши. Система обратной связи обеспечивает статизм менее 2%.

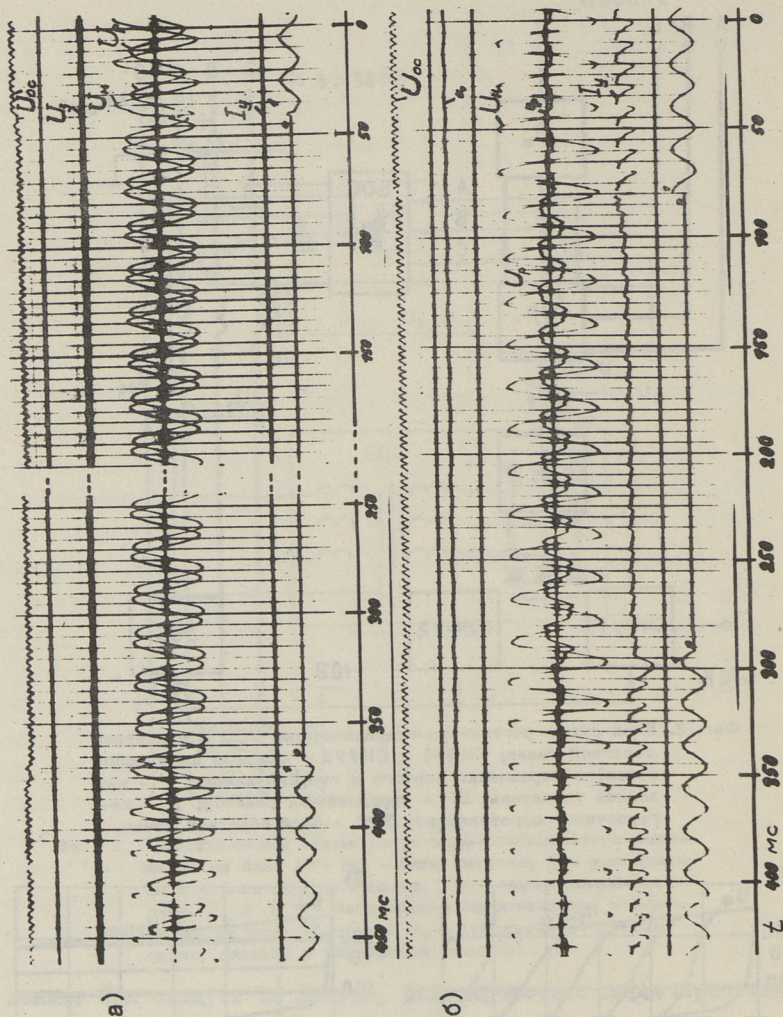
Из большого числа снятых осциллограмм работы РСН представим лишь несколько. На фиг. 5,а приведена осциллограмма токов и напряжений РСН с разомкнутой системой управления. При неизменном исходном токе управления $I_{y0} = 0$ меняется скачкообразно величина нагрузочного сопротивления. При этом ток нагрузки в относительных величинах меняется от $I = 0,4 \dots 1,2$ и обратно от $1,2 \dots 0,4$. На фиг. 5,б даны аналогичные



Фиг. 3. Блок схема регулятора-стабилизатора: УОС + усилитель обратной связи; СИФУ1 и СИФУ2 - система импульсно-фазового управления первого и второго канала; У - выходной усилитель; УР - управляемый реактор; Z_n - нагрузочное сопротивление; БОС - блок обратной связи.



Фиг. 4. Экспериментальные вольт-амперные характеристики регулятора-стабилизатора с разомкнутой (а) и с замкнутой системой управления (б) при работе на активную нагрузку.



Фиг. 5. Изменение тока и напряжения РСН с разомкнутой системой управления при скачкообразном изменении нагрузочного сопротивления.

осциллограммы при исходном токе управления $I_{y0} = 1,0$.

На фиг. 6 представлена осциллограмма замкнутой системы управления при изменении напряжения U_n (исходный ток $I_0 = 0,4$):

а) так, чтобы ток управления реактора I_y изменился от $0 \rightarrow 0,1$ и $\rightarrow 1,0 \rightarrow 0,1$;

б) так, чтобы ток управления реактора I_y изменился от $0 \rightarrow 0,3 \rightarrow 1,0 \rightarrow 0,3 \rightarrow 0$. Поскольку нагрузка активная, то характер кривой напряжения $U_n = f(t)$ соответствует также характеру кривой тока нагрузки.

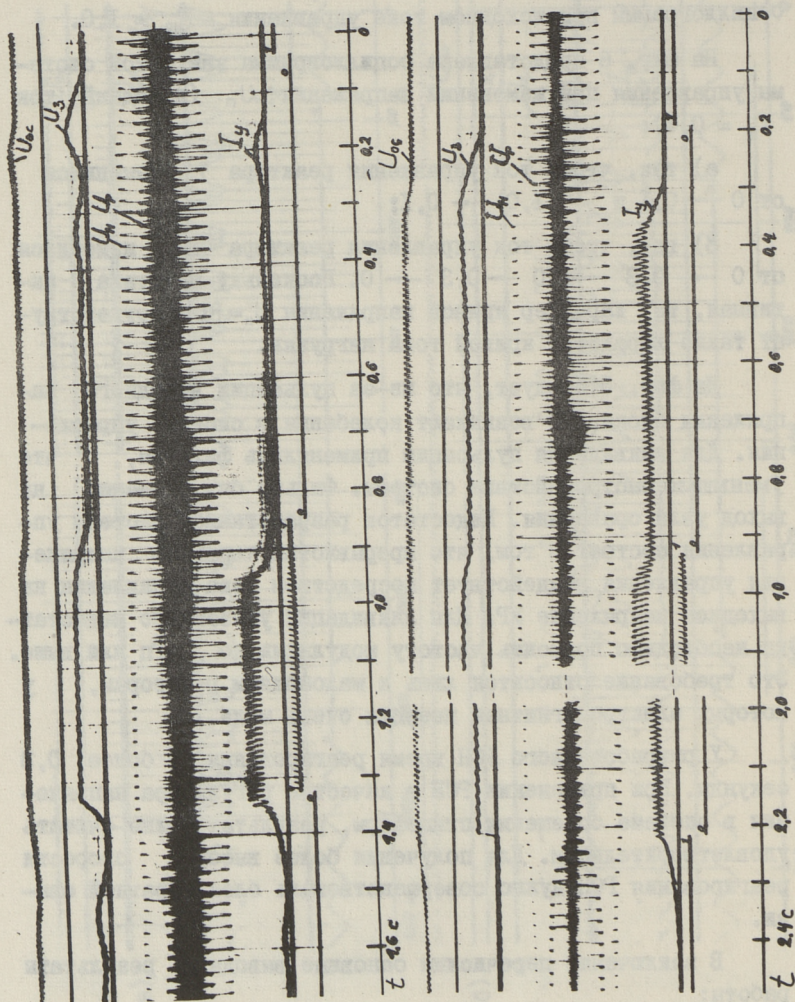
Из фиг. 5 следует, что из-за пульсации выходного напряжения блока БОС возникают колебания в системе управления. Для ликвидации пульсации применялись фильтры, что уменьшило быстродействие системы. Фильтр был размещен на выход узла сравнения. Недостаток разработанной системы управления состоит в том, что прерывистый характер напряжения управления воздействует посредством тока управления на выходное напряжение УР. Для ликвидации указанного недостатка необходимо повысить частоту модуляции до 1 кГц или выше. Это требование относится лишь к маломощным реакторам, у которых электромагнитная инерция очень мала.

У разработанного РСН время реагирования не более 0,3 секунды. При применении РСН в качестве регулятора напряжения в системе освещения птицеферм, результат можно считать удовлетворительным. Для получения более высокой скорости реагирования РСН нужно совершенствовать блок обратной связи.

В заключение перечислим основные выводы и результаты работы:

1. Индуктивность маломощных управляемых реакторов (УР) мала. Поэтому для уменьшения влияния характера кривой напряжения управления на кривую тока и напряжения трехфазной обмотки у транзисторного усилителя с широтно-импульсной модуляцией необходимо повысить частоту модуляции до 1 кГц или выше.

2. УР является регулируемой индуктивностью. Поэтому согласно круговой диаграмме УР видим, что при неизменной



Фиг. 6. Осциллограмма изменения тока и напряжения РСН с замкнутой системой управления при скачкообразном изменении сигнала задания .

мощности нагрузки с повышением коэффициента мощности потребителя для обеспечения заданного диапазона регулирования напряжения необходимо зависить установленную мощность УР. Поэтому при чисто активной нагрузке более эффективным решением является применение вместо УР управляемого подмагничиванием трансформатора.

3. Спроектирован, изготовлен и испытан УР с аксиальным магнитным потоком для регулятор-стабилизатора напряжения (РСН).

4. Изготовлен и испытан РСН на базе управляемого реактора с аксиальным магнитным потоком. Последний внедрен на птицеферме в качестве регулятора освещения, работающего от программного реле времени.

Л и т е р а т у р а

1. Linnukasvatust. Soovitusi teaduse ja tehnika saavutuste rakendamiseks põllumajanduses. ENSV Põllumajanduse Ministeeriumi Teadusliketehniline Informatsiooni Valitsus, Tallinn, nr.7, 1973.

2. Орлов В.С., Ярвик Я.Я. Статический компенсатор реактивной мощности с регулирующим звеном на базе двояного и насыщающего реакторов. См. наст. сб., с. 39.

3. Карачун В.И., Ярвик Я.Я., Ануфриев Г.И. Специфика и технология изготовления управляемых реакторов с аксиальным потоком. "Энергетика", вып. 4, Алма-Ата, 1974, с. 165-170.

4. Карачун В.И., Ярвик Я.Я., Соколов С.Е. Некоторые вопросы расчета управляемого реактора с аксиальным магнитным потоком. "Энергетика", вып. 4, Алма-Ата, 1974, с. 150-158.

5. Рейнер А.П., Ярвик Я.Я. Векторная и круговая диаграмма управляемого и насыщающегося реактора с вращающимся магнитным полем. См. наст. сб., с. 53.

Spannungsregulator auf der Basis der gesteuerten
Axialflußdrosselspule

Zusammenfassung

Es wird die Schaltung und Arbeitsweise des Spannungsregulators erklärt.

Die aufgenommenen Oszillogramme zeigen, daß der Apparat sowohl im offenen als auch im geschlossenen System funktionsfähig ist.

С о д е р ж а н и е

1. Г.К. Самолёвский. Об особенностях электромагнитных процессов асинхронных микромашин с аксиальным потоком, магнитопроводы которых содержат элементы из магнитодиэлектриков..... 3
2. Л.Э.Варик, А.А.Лаансоо, А.Э.Ритсо, Г.К. Самолёвский. О некоторых свойствах магнитодиэлектриков, предназначенных для применения в торцевых асинхронных микромашинах при повышенных частотах..... 17
3. В.С.Орлов, Я.Я.Ярвик. Резонансный ограничитель тока короткого замыкания на базе насыщающегося реактора с вращающимся магнитным полем..... 23
4. В.С.Орлов, Я.Я.Ярвик. Статический компенсатор реактивной мощности с регулирующим звеном на базе сдвоенного и насыщающегося реакторов..... 39
5. А.П.Рейнер, Я.Я.Ярвик. Векторная и круговая диаграмма управляемого и насыщающегося реактора с вращающимся магнитным полем..... 53
6. А.П.Рейнер, Я.Я.Ярвик. Регулятор-стабилизатор напряжения на базе управляемого реактора с аксиальным магнитным потоком..... 63



© ТПИ, Таллин, 1977

Таллинский политехнический институт

Труды ТПИ № 415

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА У1

Редактор Р. Вырк

Технический редактор В. Ранник

Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 15 окт. 1976 г.

Подписано к печати 6 апреля 1977 г.

Бумага 60x90/16

Печ. л. 4,75+0,25 приложение

Уч.-изд. л. 3,65

Тираж 350

МВ-00647

Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскля, 2/9

Заказ № 523

Цена 54 коп.

Э Л Е К Т Р О М Е Х А Н И К А

У I

УДК 621.313.33

Об особенностях электромагнитных процессов
асинхронных микромашин с аксиальным потоком,
магнитопроводы которых содержат элементы из
магнитодieleктриков. Самолевский Г.К. "Труды
Таллинского политехнического института", № 415,
1977, с. 3-16.

Рассматриваются процессы в асинхронном исполнительном двигателе с аксиальным потоком. Даны выражения для определения основных геометрических размеров магнитной системы с учетом пористости магнитодieleктриков.

Рассмотрены процессы с учетом короткозамкнутых контуров в магнитопроводе и выведена формула для расчета нулевой э.д.с.

В качестве иллюстрации приведены параметры опытного образца асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком, с магнитопроводом из магнитодieleктрика.

Фигур - 2, библиографических наименований - 4.

УДК 621.313.13.043-181.4

О некоторых свойствах магнитодиэлектриков,
предназначенных для применения в торцевых
асинхронных микромашинах при повышенных частотах,

Варик Л.Э., Лаансоо А.А., Ритсо А.Э., Самолевский Г.К.
"Труды Таллинского политехнического института", № 415,
1977, с. 17-22.

В данной работе рассматриваются некоторые свойства магнитодиэлектриков, предназначенных для применения в торцевых асинхронных микромашинах при повышенных частотах. Приводятся данные о влиянии связующего материала на магнитные характеристики магнитодиэлектриков при повышенных частотах. Также приводятся результаты исследования асинхронного торцевого исполнительного двигателя (частота питания 400 Гц), у которого магнитопровод статора был выполнен из магнитодиэлектрика.

Фигур - 4, библиографических наименований - 3.

УДК 621.316.723

Резонансный ограничитель тока короткого замыкания
на базе насыщаемого реактора с вращающимся
магнитным полем. Орлов В.С., Ярвик Я.Я. "Труды
Таллинского политехнического института", № 415,
1977, с. 23-38.

Характеризуется принцип работы резонансного токоограничителя на базе управляемого реактора с вращающимся магнитным полем, приводятся основные соотношения для выбора его составных элементов и расчета их параметров.

Экспериментальная часть подтверждает работоспособность устройства в случае симметричных и несимметричных режимов к.з., а также пригодность приведенных расчетных методик.

Фигур - 3, библиографических наименований - 9.

УДК 621.316.723

Статический компенсатор реактивной мощности с регулирующим звеном на базе сдвоенного и насыщающегося реакторов. Орлов В.С., Ярвик Я.Я. "Труды Таллинского политехнического института", № 415, 1977, с. 39-52.

Описана схема и принцип работы статического компенсатора (СК) с регулирующим звеном на базе сдвоенного и насыщающегося реакторов. Получены выражения для определения параметров СК и отдельных его элементов. Приводятся результаты экономического сравнения по капиталовложениям СК и синхронного компенсатора. Расчеты и опыты на физических моделях показывают, что применение СК позволяет снизить величину колебаний напряжения в 8...10 раз.

Фигур - 5, библиографических наименований - 5.

УДК 621.318.43

Векторная и круговая диаграмма управляемого и насыщающегося реактора с вращающимся магнитным полем. Рейнер А.П., Ярвик Я.Я. "Труды Таллинского политехнического института", № 415, 1977, с. 53-62.

Приводятся схемы замещения и векторные диаграммы для управляемого и насыщающегося реактора. Для инженерных расчетов при определении параметров реактора последовательно включения рекомендуется применение круговой диаграммы реактора.

Фигур - 6, библиографических наименований - 1.

Регулятор-стабилизатор напряжения на базе управляемого реактора с аксиальным магнитным потоком. Рейнер А.П., Ярвик Я.Я. "Труды Таллинского политехнического института", № 415, 1977, с. 63-74.

Характеризуется управляемый реактор (УР) с аксиальным магнитным потоком и приводятся выражения для определения величины диаметра внутреннего отверстия магнитопровода, исходя из условий размещения лобовых частей трехфазной обмотки.

Разработан регулятор-стабилизатор напряжения (РСН) на базе УР с системой управления с транзисторным усилителем с широтно-импульсной модуляцией. Характеристики РСН удовлетворительные. Регулятор внедрен на птицеферме в качестве регулятора освещенности.

Фигур - 6, библиографических наименований - 5.

Ep.6.7

620

Tallinna Polüteh
Instituut
Toimetised

N 415

1977

19.9.77. Jagomägi 1980

Цена 54 коп.