

УДК 621.311

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ОСТАНОВЛЕННОЙ ТРЕХФАЗНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

ВОЛКОВ В.А. канд. техн. наук, докторант Национального горного университета, г. Днепр, Украина, e-mail: green_stone@ukr.net

Цель работы. Исследование и оптимизация (минимизация) электрических потерь энергии в остановленной синхронной машине с тиристорным возбудителем при режимах ее намагничивания и размагничивания.

Методы исследования. Операторный и вариационного исчисления, математического анализа и имитационного компьютерного моделирования.

Полученные результаты. Разработано математическое описание исследуемой системы: «тиристорный возбудитель – остановленная синхронная машина», которое представляет собой аналитические зависимости для электромагнитных процессов, а также общих потерь мощности и энергии в указанной системе при режимах намагничивания и размагничивания синхронной машины. Методом вариационного исчисления определены оптимальные временные функции для изменения потокосцепления демпферной обмотки и тока возбуждения остановленной синхронной машины, при которых минимизируются потери энергии в исследуемой системе при намагничивании и размагничивании данной машины. Рассчитаны зависимости общих потерь энергии в исследуемой системе от длительностей времен намагничивания и размагничивания машины, а также выполнено их сравнение при различных видах (линейном, параболическом и предложенном оптимальном) траекторий изменения упомянутого потокосцепления, а также при линейном и экспоненциальном изменении тока возбуждения машины. Получены аналитические зависимости, с использованием которых выполнены расчеты электромагнитных и энергетических переходных процессов в системе «тиристорный возбудитель – остановленная синхронная машина» при рассмотренных видах изменения потокосцепления и тока возбуждения машины.

Научная новизна. Состоит в нахождении оптимальных траекторий изменения во времени тока возбуждения остановленной синхронной машины и оптимальных длительностей времен ее намагничивания и размагничивания, обеспечивающих минимизацию потерь энергии в системе «тиристорный возбудитель – остановленная синхронная машина».

Практическая ценность. Заключается в снижении непроизводительных потерь энергии в синхронных генераторах и двигателях при режимах их намагничивания и размагничивания.

Ключевые слова: синхронная машина; режимы намагничивания и размагничивания; потери электрической энергии; оптимизация.

I. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении почти ста лет мощные трехфазные синхронные машины традиционно применяются в качестве электрических генераторов переменного напряжения на тепловых, атомных и гидравлических электростанциях [1]. При этом для осуществления регулирования пиковых значений активной мощности в энергосистеме на практике в определенные часы работы энергосистемы производятся принудительно дополнительные включения или отключения гидрогенераторов на гидроэлектростанциях или гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС) [1], [2]. Причем, для гидрогенераторов большой мощности (в которых в обязательном порядке используется точный способ их синхронизации с электрической сетью) перед очередным пуском гидроагрегата предварительно осуществляется подача тока возбуждения (режим намагничивания) для остановленной синхронной машины (СМ), а после остановки гидроагрегата – снятие указанного тока возбуждения (режим размагничивания) для остановленной СМ [3].

С промышленным созданием высоковольтных полупроводниковых преобразователей частоты синхронные машины большой мощности при частотном способе их регулирования стали широко применяться, в том числе для работы в двигательном режиме (как в автоматизированных электроприводах большой мощности, так и в энергетике – для обеспечения насосного режима работы обратимых гидроагрегатов на гидроаккумулирующих электростанциях) [4]. В частотно-регулируемых СМ, работающих в двигательном режиме, также перед пуском осуществляется предварительное намагничивание, а после остановки (при продолжительном ее характере) – последующее размагничивание остановленной СМ.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Принимая же во внимание наблюдающееся удорожание в мире и Украине электрической энергии, становится актуальным и востребованным практикой снижение непроизводительных потерь энергии в синхронных генераторах или частотнорегулируемых

синхронных двигателях при режимах их начального намагничивания и последующего (после окончательной остановки) размагничивания.

Проведенный обзор известной отечественной и зарубежной научно-технической литературы показывает, что для уменьшения непроизводительных потерь энергии в системах возбуждения СМ и повышения их эксплуатационной надежности в них стали применяться (взамен электромашинных) тиристорные возбудители (ТВ). В ряде известных публикаций (например, в [5], [6]) подробно рассмотрены существующие электрические схемы ТВ, приведены результаты исследований электромагнитных процессов регулирования тока возбуждения и основного магнитного потока в синхронной машине, а также потерь мощности в этой машине с тиристорным возбудителем.

Причем все известные публикации, посвященные исследованию потерь мощности и энергии для синхронной машины, рассматривают эти потери при номинальной (синхронной) скорости или при режимах ее синхронизации с электрической сетью (при скоростях, как известно, близких к номинальной) [5], либо (при частотном способе регулирования) – в рабочем диапазоне изменения ее скоростей [6]. Но при этом до настоящего времени остаются неисследованными потери энергии и их оптимизация (минимизация) для остановленной синхронной машины при режимах ее намагничивания и размагничивания.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью предложенной статьи является исследование и оптимизация (минимизация) электрических потерь энергии в остановленной синхронной машине с тиристорным возбудителем при режимах ее намагничивания и размагничивания.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При исследованиях приняты допущения:

- рассматривались режимы намагничивания и размагничивания остановленной СМ, снабженной демпферной обмоткой;

- исследовались только основные составляющие электрических потерь мощности и энергии в СМ, вызванные основной составляющей тока ТВ (то есть, без учета влияния высших гармонических составляющих этого тока, вызванных пульсациями выходного напряжения трехфазной мостовой схемы управляемого выпрямителя, содержащейся в составе ТВ);

- при исследуемых режимах внутренние параметры (активные сопротивления и индуктивности) схемы замещения СМ принимались неизменными, а ее фазные статорные обмотки – разомкнутыми;

- при дальнейших расчетах и исследованиях использовались общепринятые для синхронных машин условные обозначения их параметров и математическое описание этой машины в ортогональной координатной системе «d-q», связанной вещественной осью «d» с осью магнитного поля обмотки ротора [7].

Исследования проводились на примере параметров из табл.1 для синхронного генератора-двигателя СВО-733/130-36 (мощностью 45,6 МВА) [8], установленного на Киевской ГАЭС, и тиристорного возбудителя к нему типа P320 фирмы ALSTOM (с номинальными значениями выходных напряжения 240 В и тока 1400 А, с коэффициентом полезного действия 96%).

На первом этапе приведем аналитические зависимости для расчета электрических потерь мощности в системе «ТВ – остановленная СМ» в режимах намагничивания и размагничивания данной машины, снабженной демпферной (короткозамкнутой) обмоткой. При этом наличие в СМ демпферной обмотки (ДО) обусловлено ее назначением: в синхронных генераторах – для ослабления обратного синхронного поля при несимметричной нагрузке, успокоения качаний ротора, предотвращения динамических перенапряжений при несимметричных коротких замыканиях и повышения электродинамической стойкости, а в синхронных двигателях для осуществления асинхронного пуска и успокоения качаний ротора [9].

Электрические потери мощности ΔP_{Σ} в системе «ТВ – остановленная СМ» определяются в виде суммы электрических потерь мощности для тиристорного возбудителя $\Delta P_{m\theta}$ и остановленной СМ ΔP_{cm} :

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{m\theta} + \Delta P_{cm} \quad (1)$$

Электрические потери мощности в тиристорном возбудителе находятся из зависимости [10, 11]:

$$\Delta P_{m\theta} = n \cdot U_{cp} \cdot i_f + (R_{m\theta} - R_j) \cdot i_f^2 \quad (2)$$

в которой используются следующие обозначения: i_f – ток обмотки возбуждения (или выходной ток тиристорного возбудителя); $R_{m\theta}$ – эквивалентное значение активного сопротивления тиристорного возбудителя; U_{cp} – граничное значение прямого падения напряжения на открытых вентилях (тиристорах) ТВ; n – коэффициент, учитывающей применяемую трехфазную схему выпрямителя для тиристорного возбудителя ($n = 2$ – для мостовой или $n = 1$ – для нулевой схемы); R_j – фиктивное активное сопротивление тиристорного выпрямителя.

При этом суммарное активное сопротивление $R_{m\theta}$ тиристорного возбудителя определяется в виде:

$$R_{m\theta} = n \cdot (R'_{mc} + R_{mo} + R_{\theta d}) + R_{ou} + R_j, \quad (3)$$

где R_{mo} – активное сопротивление фазы входного токоограничивающего реактора (если он отсутствует, то $R_{mo} = 0$); $R_{\theta d}$ – активное дифференциальное сопротивление открытого вентиля (тиристора) [10];

Таблица 1. Параметры исследуемой системы «ТВ – остановленная СМ»

	Условные обозначения параметра										
	$R_{m\epsilon}$	R_j	L_ϕ	$U_{\epsilon p}$	$\Delta U_{\text{щ}}$	R_f	k_{mp}	$L_{\sigma f}$	L_{ad}	$L_{\sigma kd}$	R_{kd}
Ед. измер.	МОм	МОм	мкГн	В	В	Ом	о.е.	мГн	мГн	мГн	Ом
Значение	10,40	2,69	4,48	1,27	1	0,164	3,05	1,390	7,099	0,4908	0,0266

$R_{\text{ош}}$ – активное сопротивление ошиновки тиристорного возбудителя; R'_{mc} – приведенное ко вторичной обмотке активное сопротивление фазы короткого замыкания силового трансформатора, питающего ТВ, вычисляемое из соотношения [12]:

$$R'_{mc} = R_l / k_{mp}^2 + R'_2, \quad (4)$$

в котором R_l и R'_2 – активные сопротивления для «Т»-образной схемы замещения этого трансформатора; k_{mp} – его коэффициент трансформации.

В зависимостях (2) и (3) фиктивное активное сопротивление R_j учитывает снижение выходного напряжения ТВ, вызванное влиянием угла коммутации вентилей (тиристоров) из-за присутствия индуктивности во входных цепях переменного тока ТВ. Данное фиктивное сопротивление вычисляется в виде [11]:

$$R_j = \frac{3 \cdot n}{\pi} \cdot x_\phi = 6 \cdot n \cdot f_c \cdot L_\phi, \quad (5)$$

где $f_c = 50$ Гц – частота электрической сети.

В последней формуле (5) параметры x_ϕ и L_ϕ представляют собой соответственно индуктивное сопротивление и индуктивность фазы переменного тока ТВ, определяемые в виде суммы индуктивного сопротивления x_{mo} (или индуктивности L_{mo}) фазы токоограничивающего реактора и приведенного ко вторичной обмотке индуктивного сопротивления x'_{mc} (или индуктивности L'_{mc}) короткого замыкания фазы трансформатора, питающего ТВ:

$$x_\phi = x_{mo} + x'_{mc}, \quad L_\phi = L_{mo} + L'_{mc} \quad (6)$$

где x'_{mc} и L'_{mc} – находятся через фазные индуктивные сопротивления первичной x_l и вторичной x'_2 обмоток (или через их индуктивности L_l и L'_2) питающего возбудитель трансформатора в виде [12]:

$$x'_{mc} = x_l / k_{mp}^2 + x'_2, \quad L'_{mc} = L_l / k_{mp}^2 + L'_2. \quad (7)$$

Далее рассмотрим потери мощности ΔP_{cm} для остановленной СМ (при разомкнутых фазных статорных обмотках) в режимах ее намагничивания и размагничивания, которые представляют собой сумму электрических потерь мощности на щеточных контак-

тах ($\Delta P_{\text{щ}}$) и активном сопротивлении (ΔP_f) обмотки возбуждения (ОВ), в ее демпферной обмотке (ΔP_k):

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_f + \Delta P_k, \quad (8)$$

рассчитываемых из соотношений [9]:

$$\Delta P_{\text{щ}} = 2\Delta U_{\text{щ}} \cdot i_f, \quad \Delta P_f = R_f \cdot i_f^2 \quad \text{и} \quad \Delta P_k = R_{kd} \cdot i_{kd}^2, \quad (9)$$

где $2\Delta U_{\text{щ}}$ – переходное падение напряжения на щеточных контактах обмотки возбуждения; R_f – активное сопротивление ОВ; R_{kd} и i_{kd} – соответственно активное сопротивление и ток (по продольной оси «d», связанной с осью магнитного потока сцепления обмотки возбуждения СМ) демпферной обмотки, приведенные к статорной обмотке указанной машины.

Ток i_{kd} определяется через электродвижущую силу (ЭДС) e_{kd} демпферной обмотки СМ [7]:

$$i_{kd} = e_{kd} / R_{kd} \quad \text{и} \quad e_{kd} = \Psi'_{kd}, \quad (10)$$

где Ψ_{kd} и Ψ'_{kd} – потокосцепление демпферной обмотки этой машины по продольной оси и его производная по времени соответственно.

С учетом (8) – (10) получим расчетные зависимости для электрических потерь мощности в СМ при режимах намагничивания и размагничивания:

$$\begin{aligned} \Delta P_{cm} &= 2\Delta U_{\text{щ}} \cdot i_f + R_f \cdot i_f^2 + R_{kd} \cdot i_{kd}^2 = \\ &= 2\Delta U_{\text{щ}} \cdot i_f + R_f \cdot i_f^2 + (\Psi'_{kd})^2 / R_{kd}. \end{aligned} \quad (11)$$

Исходя из (2) и (11) преобразуем выражение (1) для общих электрических потерь мощности в системе «ТВ – остановленная СМ» к виду:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_\Sigma &= Y \cdot i_f + Z \cdot (i_f)^2 + (\Psi'_{kd})^2 / R_{kd}, \\ Y &= n \cdot U_{\epsilon p} + 2\Delta U_{\text{щ}}, \quad Z = R_{m\epsilon} - R_j + R_f. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Анализ формул (11) и (12) свидетельствует о том, что из них затруднен расчет электрических потерь мощности для СМ, содержащей ДО, и для системы «ТВ – остановленная СМ», так как в этих формулах присутствуют одновременно по две переменные величины: ток возбуждения i_f и ток i_{kd} или потокосцепление Ψ_{kd} демпферной обмотки.

На втором этапе математические зависимости

для электрических потерь мощности остановленной СМ, снабженной ДО, преобразуем к виду функции от одной переменной величины – потокосцепления Ψ_{kd} этой обмотки по продольной оси (при этом выбор указанной переменной обусловлен относительной сложностью математического выражения указанных электрических потерь мощности СМ непосредственно через ток возбуждения i_f).

Для этого представим и проанализируем изображенную на рис.1 эквивалентную схему электромагнитных контуров остановленной СМ, приведенных к ее статорной обмотке. В данной схеме используются обозначения: Ψ_{f1} и i_{f1} – приведенные к статору потокосцепление и ток, создаваемые ОВ; Ψ_{ad} – потокосцепление по продольной оси СМ, вызванное взаимоиндуктивной связью ее ОВ и демпферной обмотки; Ψ_{kd} – потокосцепление демпферной обмотки СМ по продольной оси. Обратим внимание, что при рассматриваемом остановленном состоянии СМ составляющие (проекции) всех векторов ее потокосцеплений и токов на поперечную ось «q» машины равны нулю (поскольку в рассматриваемых режимах отсутствуют электродвижущие силы, вызывающие потокосцепления и токи по поперечной оси).

Согласно схемы замещения на рис.1 электромагнитные контуры остановленной СМ описываются следующими математическими соотношениями [7, 9]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{f1} &= L_{\sigma f} \cdot i_{f1} + L_{ad} \cdot (i_{f1} + i_{kd}) = \\ &= (L_{\sigma f} + L_{ad}) \cdot i_{f1} + L_{ad} \cdot i_{kd}, \\ \Psi_{kd} &= L_{ad} (i_{f1} + i_{kd}) + L_{\sigma kd} \cdot i_{kd} = \\ &= L_{ad} \cdot i_{f1} + (L_{ad} + L_{\sigma kd}) \cdot i_{kd}, \\ \Psi_{ad} &= L_{ad} \cdot (i_{f1} + i_{kd}) = \Psi_{kd} - L_{\sigma kd} \cdot i_{kd} \end{aligned} \right\} (13)$$

где используются приведенные к статорной обмотке СМ переменные величины: главное потокосцепление (взаимоиндукции) Ψ_{ad} , потокосцепления демпферной Ψ_{kd} и ОВ Ψ_{f1} и параметры: индуктивности рассеяния демпферной обмотки $L_{\sigma kd}$ и ОВ $L_{\sigma f}$; взаимная индуктивность L_{ad} (между ОВ и демпферной обмоткой); эквивалентное (в части создания одинаковой величины магнитодвижущей силы в контуре

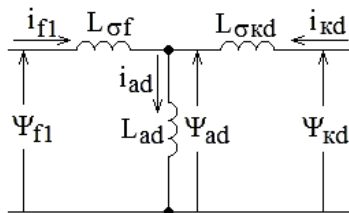


Рисунок 1. Схема замещения электромагнитных контуров остановленной СМ

приведенное к статорной обмотке СМ. При этом величина i_{f1} определяется через значения обмоточных коэффициентов $k_{об.1}$, $k_{об.f}$ и количество витков w_1 , w_f статорной обмотки и обмотки возбуждения, число пар полюсов z_p СМ из зависимостей [7, 9]:

$$i_{f1} = z_p \cdot i_f / k_{np}, \quad (14)$$

где $k_{np} = k_{об.1} \cdot w_1 / k_{об.f} \cdot w_f$ – коэффициент приведения по напряжению (или ЭДС) от обмотки возбуждения к статорной обмотке СМ.

Введем в пользование коэффициент связи k_k демпферной обмотки, рассчитываемый в виде:

$$k_k = L_{ad} / (L_{ad} + L_{\sigma kd}), \quad (15)$$

и найдем из первого и второго соотношений из (13) зависимости для тока i_{kd} :

$$\left. \begin{aligned} i_{kd} &= \left[\Psi_{f1} - (L_{\sigma f} + L_{ad}) \cdot i_{f1} \right] / L_{ad}, \\ i_{kd} &= \left[\Psi_{kd} - L_{ad} \cdot i_{f1} \right] / (L_{ad} + L_{\sigma kd}). \end{aligned} \right\} (16)$$

Подставив последнее выражение из (16) для тока i_{kd} в первое уравнение системы (13), получим с учетом (15) и последнего соотношения из (13) зависимость между магнитным потокосцеплением Ψ_{f1} , потокосцеплениями Ψ_{ad} , Ψ_{kd} и током возбуждения i_{f1} в схеме замещения остановленной СМ на рис.1:

$$\Psi_{ad} = \Psi_{f1} - L_{\sigma f} \cdot i_{f1} = k_k (\Psi_{kd} + L_{\sigma kd} \cdot i_{f1}). \quad (17)$$

Далее для приведения расчетного соотношения (11) для электрических потерь мощности СМ (снабженной ДО) от функции двух переменных (тока возбуждения i_f и потокосцепления Ψ_{kd}) к функции одной из этих переменных, составим для замкнутого контура демпферной обмотки СМ (образованного элементами: L_{ad} , $L_{\sigma kd}$ и R_{kd} из соответствующей электрической схемы замещения на рис.2) уравнение:

$$0 = e_{ad} + L_{\sigma kd} \cdot i'_{kd} + R_{kd} \cdot i_{kd}, \quad (18)$$

где $e_{ad} = \Psi'_{ad}$ – приведенная к статорной обмотке ЭДС взаимоиндукции СМ.

Исходя из этой схемы замещения, последнего

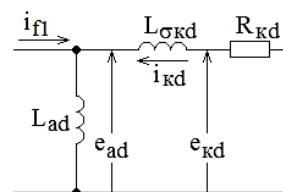


Рисунок 2. Электрическая схема замещения контура демпферной обмотки СМ

соотношения из (16) и выражения (17), преобразуем уравнение (18) к виду:

$$0 = k_{\kappa} \left[\Psi'_{kd} + L_{\sigma kd} \cdot i'_{f1} \right] + L_{\sigma kd} \left[\left(\Psi'_{kd} - L_{ad} \cdot i'_{f1} \right) / \right. \\ \left. / (L_{ad} + L_{\sigma kd}) \right] + R_{kd} \left[\left(\Psi_{kd} - L_{ad} \cdot i_{f1} \right) / (L_{ad} + L_{\sigma kd}) \right], \quad (19)$$

где i'_{f1} – производная тока i_{f1} по времени.

Принимая во внимание соотношение (15), преобразуем выражение (19) к зависимости

$$L_{ad} \cdot i_{f1} = \Psi_{kd} + T_{\kappa} \cdot \Psi'_{kd}, \quad (20)$$

где $T_{\kappa} = (L_{ad} + L_{\sigma kd}) / R_{kd} -$ (21)

электромагнитная постоянная времени демпферной обмотки синхронной машины.

Выразив из (20) значение для тока возбуждения i_{f1} (приведенного к статорной обмотке):

$$i_{f1} = (\Psi_{kd} + T_{\kappa} \cdot \Psi'_{kd}) / L_{ad}, \quad (22)$$

рассчитаем с учетом (14) значение тока i_f , непосредственно протекающего в обмотке возбуждения СМ:

$$i_f = i_{f1} \cdot k_{np} / z_p = \frac{k_{np}}{z_p L_{ad}} \cdot (\Psi_{kd} + T_{\kappa} \cdot \Psi'_{kd}) \quad (23)$$

Подставив из (23) значение для тока возбуждения i_f в (12), преобразуем эту зависимость для электрических потерь мощности в системе «ТВ – остановленная СМ» к виду:

$$\Delta P_{\text{э}} = a_1 \cdot \Psi_{kd}^2 + a_2 \cdot \Psi_{kd} + a_3 \cdot (\Psi'_{kd}) + \\ + a_4 \cdot (\Psi_{kd} \cdot \Psi'_{kd}) + a_5 \cdot (\Psi'_{kd})^2, \quad (24)$$

полученному через единственную переменную величину Ψ_{kd} , где постоянные коэффициенты a_1, a_2, a_3, a_4 и a_5 находятся из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= Z \cdot \left(\frac{k_{np}}{z_p L_{ad}} \right)^2, & a_4 &= 2T_{\kappa} \cdot Z \cdot \left(\frac{k_{np}}{z_p L_{ad}} \right)^2, \\ a_2 &= Y \cdot \left(\frac{k_{np}}{z_p L_{ad}} \right), & a_5 &= T_{\kappa}^2 \cdot Z \cdot \left(\frac{k_{np}}{z_p L_{ad}} \right)^2 + \frac{1}{R_{kd}}, \\ a_3 &= Y \cdot T_{\kappa} \cdot \left(\frac{k_{np}}{z_p L_{ad}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

На *третьем этапе* приведем исходные расчетные зависимости для общих потерь электроэнергии (ОПЭ) ΔW_n и ΔW_p в системе «ТВ – остановленная СМ» при режимах ее намагничивания и размагничивания соответственно:

$$\Delta W_n = \int_0^{t_n} \Delta P_{\text{э}} \cdot dt \quad \Delta W_p = \int_0^{t_p} \Delta P_{\text{э}} \cdot dt, \quad (26)$$

а также определим вид траекторий изменения во времени потокосцепления Ψ_{kd} демпферной обмотки и тока возбуждения i_f остановленной СМ, при которых минимизируются значения общих электромагнитных потерь в ней при указанных режимах.

В зависимостях (26) используются обозначения: $\Delta P_{\text{э}}$ – текущие общие электрические потери мощности в системе «ТВ – остановленная СМ», рассчитываемые из (24); t_n и t_m – длительности времен соответственно намагничивания и размагничивания СМ; t – текущее время, отсчитываемое от наступления и на протяжении рассматриваемых режимов намагничивания ($0 \leq t \leq t_n$) и размагничивания ($0 \leq t \leq t_p$).

Как известно из теории вариационного исчисления, экстремальные значения интегралов из (26) достигаются при условии соответствия подинтегральной функции $\Delta P_{\text{э}}$ из (24) уравнению Эйлера [13]:

$$\frac{\partial^2(\Delta P_{\text{э}})}{\partial^2(\Psi'_{kd})} \cdot \Psi''_{kd} + \frac{\partial^2(\Delta P_{\text{э}})}{\partial(\Psi_{kd}) \cdot \partial(\Psi'_{kd})} \cdot \Psi'_{kd} + \\ + \frac{\partial^2(\Delta P_{\text{э}})}{\partial(\Psi_{kd}) dt} - \frac{\partial(\Delta P_{\text{э}})}{\partial(\Psi_{kd})} = 0, \quad (27)$$

где $\Psi''_{kd} = d^2 \Psi_{kd} / d^2 t$ – вторая производная потокосцепления Ψ_{kd} по времени t .

После подстановки $\Delta P_{\text{э}}$ из (24) в (27) рассчитаем частные производные в уравнении Эйлера:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\Delta P_{\text{э}})}{\partial(\Psi_{kd})} &= 2a_1 \cdot \Psi_{kd} + a_2 + a_4 \cdot \Psi'_{kd}, \\ \frac{\partial^2(\Delta P_{\text{э}})}{\partial(\Psi_{kd}) \cdot \partial(\Psi'_{kd})} &= a_4, & \frac{\partial^2(\Delta P_{\text{э}})}{\partial(\Psi_{kd}) dt} &= 0, \\ \frac{\partial(\Delta P_{\text{э}})}{\partial(\Psi'_{kd})} &= a_3 + a_4 \cdot \Psi_{kd} + 2a_5 \cdot \Psi'_{kd}, \\ \frac{\partial^2(\Delta P_{\text{э}})}{\partial^2(\Psi'_{kd})} &= 2a_5. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Причем, согласно условию Лежандра [13], при положительном значении частной производной $\partial^2(\Delta P_{\text{э}}) / \partial^2(\Psi'_{kd})$ интегралы из (26) имеют минимальные, а при отрицательном – максимальные значения.

Подставив значения частных производных из (28) в уравнение (27), преобразуем уравнение Эйлера к следующему линейному дифференциальному уравнению второго порядка:

$$\Psi_{kd}'' = \frac{a_1}{a_5} \cdot \Psi_{kd} + \frac{a_2}{2a_5} \quad (29)$$

от переменной величины Ψ_{kd} , которое далее представим в более простом виде

$$\Psi_{kd}'' = K \cdot \Psi_{kd} + N \quad (30)$$

с использованием в нем только двух коэффициентов K и N , рассчитываемых с учетом (25), второго и третьего соотношений в (12) из выражений:

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{a_1}{a_5} = \frac{1}{T_{\kappa}^2} \cdot \frac{Z \cdot k_{np}^2}{Z \cdot k_{np}^2 + z_p^2 \cdot k_{\kappa}^2 \cdot R_{kd}}, \\ N &= \frac{a_2}{2a_5} = \frac{1}{2T_{\kappa}^2} \cdot \frac{Y \cdot k_{np} \cdot z_p \cdot L_{ad}}{Z \cdot k_{np}^2 + z_p^2 \cdot k_{\kappa}^2 \cdot R_{kd}} \end{aligned} \right\}. \quad (31)$$

Общим решением дифференциального уравнения (30) является зависимость

$$\Psi_{kd}(t) = C_1 \cdot e^{\sqrt{K}t} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{K}t} - \frac{N}{K}, \quad (32)$$

где C_1 и C_2 – постоянные величины (определяемые исходя из начальных и конечных условий).

Напомним, что по окончании режима намагничивания остановленной СМ необходимо создание в этой машине заданного значения главного потокосцепления $\Psi_{ad}^* = \Psi_{ad}(t_n)$, а по окончании режима размагничивания – обеспечить снижение этого потокосцепления до нулевого значения $\Psi_{ad}(t_p) = 0$. С учетом этого из соотношения (23) находятся установившиеся (соответствующие установившимся режимам) значения токов возбуждения $i_f(t > t_n)$ и $i_f(0)$ СМ, которые присутствуют после окончания режима намагничивания или предшествовали наступлению режима размагничивания соответственно:

$$i_f(t > t_n) = \frac{k_{np} \Psi_{ad}(t_n)}{z_p L_{ad}} \quad \text{и} \quad i_f(0) = \frac{k_{np} \Psi_{ad}(0)}{z_p L_{ad}}. \quad (33)$$

Исходя из (10), (33) и последнего соотношения из (13), найдем из второго соотношения в (13) значения $\Psi_{kd}(t_n)$ и $\Psi_{kd}(0)$ потокосцеплений демпферной обмотки СМ:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{kd}(t_n) &= \Psi_{ad}(t_n) + T_{\sigma kd} \cdot \Psi_{kd}'(t_n), \\ \Psi_{ad}(t_n) &= \frac{z_p L_{ad}}{k_{np}} \cdot i_f(t > t_n) \end{aligned} \right\}, \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{kd}(0) &= \Psi_{ad}(0) + T_{\sigma kd} \cdot \Psi_{kd}'(0), \\ \Psi_{ad}(0) &= \frac{z_p L_{ad}}{k_{np}} \cdot i_f(0) \end{aligned} \right\}, \quad (35)$$

соответствующие моментам времени окончания ре-

жима намагничивания и начала режима размагничивания, где $T_{\sigma kd}$ – электромагнитная постоянная времени рассеяния ДО по продольной оси:

$$T_{\sigma kd} = L_{\sigma kd} / R_{kd}. \quad (36)$$

Особо следует уделить внимание рассмотрению режима окончания размагничивания СМ, когда из-за уже малого значения потокосцепления $\Psi_{kd}(t_{p1})$ при времени t_{p1} требуется, согласно (23), создание отрицательного значения тока i_f возбуждения. Это же на практике оказывается технически невозможным из-за обычно нереверсивного выполнения ТВ. Фактически в этом случае происходит автоматическое закрытие тиристоров ТВ, вследствие чего ток возбуждения i_f спадает до нуля. После этого дальнейшему режиму размагничивания (до полного размагничивания машины) соответствует (согласно выражению (23) при токе возбуждения i_f , равном нулю) экспоненциальное изменение потокосцепления $\Psi_{kd}(\tau)$ ДО:

$$\Psi_{kd}(\tau) = \Psi_{kd}(t_{p1}) \cdot e^{-\tau/T_{\kappa}}, \quad (37)$$

где τ – текущее время, отсчитываемое от момента времени t_{p1} достижения током возбуждения i_f нулевого значения.

С учетом вышеизложенного зададимся граничными условиями при режимах намагничивания:

$$1) \text{ при } t = 0: \Psi_{kd}(0) = 0; \quad 2) \text{ при } t = t_n: \Psi_{kd} = \Psi_{kd}(t_n)$$

и размагничивания СМ:

$$1) \text{ при } t = 0: \Psi_{kd} = \Psi_{kd}(0); \quad 2) \text{ при } t = t_p: \Psi_{kd}(t_p) = 0.$$

Исходя из этих условий, определим из (32) значения постоянных коэффициентов C_1 и C_2 в виде:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\Psi_{kd}(t_n) - \frac{N}{K} \cdot e^{-\sqrt{K}t_n} + \frac{N}{K}}{e^{\sqrt{K}t_n} - e^{-\sqrt{K}t_n}}, \\ C_2 &= \frac{N}{K} - C_1 \end{aligned} \right\} - \quad (38)$$

для намагничивания и

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\frac{N}{K} - \left[\frac{N}{K} + \Psi_{kd}(0) \right] \cdot e^{-\sqrt{K}t_p}}{e^{\sqrt{K}t_p} - e^{-\sqrt{K}t_p}}, \\ C_2 &= \frac{N}{K} + \Psi_{kd}(0) - C_1 \end{aligned} \right\} - \quad (39)$$

для размагничивания.

Подставив (при соответствующих значениях из (38) или (39) коэффициентов C_1 и C_2) значения потокосцепления $\Psi_{kd}(t)$ из (32) в выражение (22), полу-

чим с учетом (23) временные зависимости для оптимального изменения тока возбуждения $i_f(t)$ СМ:

$$i_f(t) = \frac{k_{np}}{z_p L_{ad}} \left[C_1 \cdot e^{\sqrt{K}t} (I + T_k \sqrt{K}) + C_2 \cdot e^{-\sqrt{K}t} (I - T_k \sqrt{K}) - \frac{N}{K} \right] \quad (40)$$

при намагничивании и размагничивании, обеспечивающие минимизацию ОПЭ в системе «ТВ – остановленная СМ» в указанных режимах.

Рассчитанные из выражений (12), (15) и (31) для рассмотренных типов СМ и ТВ значения коэффициентов составляют: $Y = 4,54$ В; $Z = 0,1717$ Ом; $k_k = 0,9353$ о.е.; $K = 2,1473$ 1/с² и $N = 1,1893$ В/с²; установившиеся значения Ψ_{ad}^* и $i_f(0)$ соответственно равны 25 Вб и 597 А, а вычисленные из (21) и (40) электромагнитные постоянные времени СМ равны: $T_k = 0,2853$ с и $T_\sigma = 0,0185$ с.

На четвертом этапе для параметров (приведенных к температуре 115 °С и представленных в табл.1) ТВ и синхронной машины СВО-733/130-36, установленных на Киевской ГАЭС, рассчитаны потери электроэнергии и переходные электромагнитные процессы в системе «ТВ – остановленная СМ» в режимах намагничивания и размагничивания применительно к полученному оптимальному управлению из (32) и (40), которое назовем «управлением 1», а также для следующих видов управления потокосцеплением:

$$\Psi_{kd}(t) = \Psi_{kd}(t_n) \cdot \left(\frac{t}{t_n} \right) \text{ и } \Psi_{kd}(t) = \Psi_{kd}(0) \cdot \left(\frac{t_p - t}{t_p} \right) \quad (41)$$

(которое назовем «управление 2»),

$$\Psi_{kd}(t) = \Psi_{kd}(t_n) \cdot \left(\frac{t}{t_n} \right)^2 \text{ и } \Psi_{kd}(t) = \Psi_{kd}(0) \cdot \left(\frac{t_p - t}{t_p} \right)^2 \quad (42)$$

(которое назовем «управление 3»), и для двух видов управления током возбуждения СМ:

$$i_f(t) = i_f(t_n) \cdot (I - e^{-t/T_m}) \text{ и } i_f(t) = i_f(0) \cdot e^{-t/T_m} \quad (43)$$

(которое назовем «управление 4») и

$$i_f(t) = i_f(t_n) \cdot \left(\frac{t}{t_n} \right) \text{ и } i_f(t) = i_f(0) \cdot \left(\frac{T_m - t}{T_m} \right) \geq 0 \quad (44)$$

(назовем «управлением 5»).

Как следует из вида зависимостей (41) – (44), первые две из этих зависимостей характеризуются линейным и параболическим видами изменения потокосцепления $\Psi_{kd}(t)$ в рассматриваемых режимах, третья зависимость (43) – характеризуется экспонен-

циальным видом изменения тока возбуждения $i_f(t)$ с варьируемым значением постоянной времени $T_m \geq 0,02$ с замкнутого контура регулирования тока возбуждения (выполненного в виде апериодического звена), а четвертая зависимость (44) – линейным изменением во времени тока возбуждения $i_f(t)$. Причем, левые математические соотношения в выражениях (41) – (44) относятся к режиму намагничивания, а правые – к режиму размагничивания СМ.

С использованием операторного метода и с учетом выражений (43) определим из (23) временные зависимости для изменения потокосцепления $\Psi_{kd}(t)$ демпферной обмотки СМ при управлении 4:

$$\Psi_{kd}(t) = i_f(t_n) \cdot \frac{z_p L_{ad}}{k_{np}} \cdot \left(I + \frac{T_m e^{-t/T_m} - T_k e^{-t/T_k}}{T_k - T_m} \right) = \Psi_{kd}(t_n) \cdot \left[\frac{(T_k - T_m) + T_m e^{-t/T_m} - T_k e^{-t/T_k}}{(T_k - T_m) + T_m e^{-t_n/T_m} - T_k e^{-t_n/T_k}} \right] \quad (45)$$

для намагничивания и

$$\Psi_{kd}(t) = i_f(0) \cdot \frac{z_p L_{ad}}{k_{np}} \cdot \left(\frac{T_k e^{-t/T_k} - T_m e^{-t/T_m}}{T_k - T_m} \right) = \Psi_{kd}(0) \cdot \left[\frac{T_k e^{-t/T_k} - T_m e^{-t/T_m}}{T_k - T_m} \right] \quad (46)$$

для размагничивания СМ.

Принимая во внимание отсутствие в существующей научно-технической литературе табличных зависимостей для перехода от операторного изображения к временному оригиналу применительно к определению потокосцепления $\Psi_{kd}(t)$ СМ при линейном управлении 5, для этого управления текущее значение указанного потокосцепления находилось методом имитационного компьютерного моделирования (при формировании от источника тока требуемого линейно изменяющегося во времени тока $i_{fI}(t)$ возбуждения в схеме замещения на рис.2).

Для упомянутых различных видов управления 1 – 5 из зависимостей (26) при варьировании длительностей времен намагничивания t_n и размагничивания t_p рассчитаны численными методами [14, 15] ОПЭ в системе «ТВ – остановленная СМ», для которых графические зависимости изображены на рис.3. Результаты данных расчетов (в которых потери электроэнергии $\Delta W_{см}$ в остановленной СМ и ее демпферной обмотке ΔW_k вычислялись из соотношений:

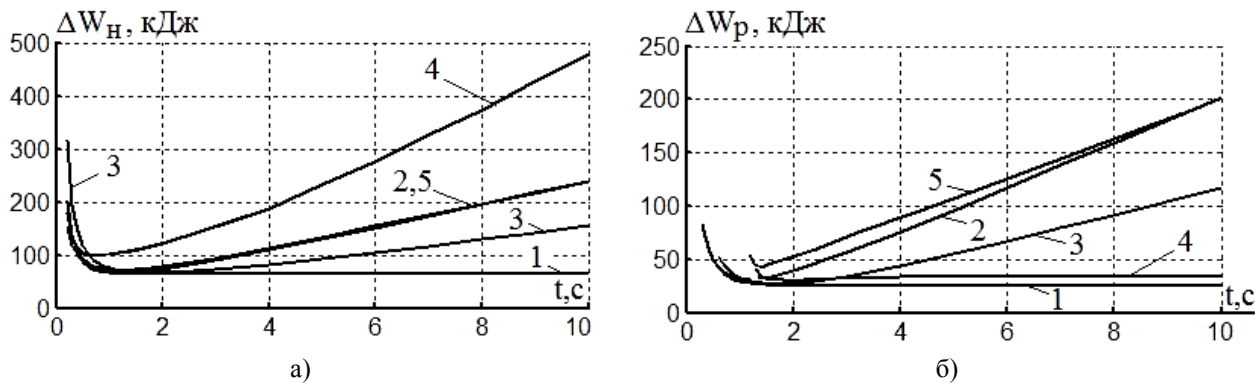


Рисунок 3. Зависимости ОПЭ ΔW_n и ΔW_p в системе «ТВ – остановленная СМ» от времен t_n и t_p

Таблица 2. Значения оптимальных значений ΔW_n^o и ΔW_p^o общих потерь электроэнергии, их составляющих ΔW_{me} , ΔW_{cm} , ΔW_k и соответствующих им оптимальных времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o

Вид управления	Намагничивание					Размагничивание				
	t_n^o	ΔW_n^o	ΔW_{me}	ΔW_{cm}	ΔW_k	t_p^o	ΔW_p^o	ΔW_{me}	ΔW_{cm}	ΔW_k
Ед. измер.	с	кДж	кДж	кДж	кДж	с	кДж	кДж	кДж	кДж
Управление 1	3	65.25	3.391	61.86	18.98	3,4	25,30	0,809	24,49	17,97
Управление 2	1,2	70.20	3,498	66.70	20.22	1,2	28,74	1,015	27,72	16,95
Управление 3	1,8	65.62	3,392	62.23	18.16	1,8	26,40	0,862	25,54	17,27
Управление 4	0,66	99.09	3.288	95.80	48.25	2	38,64	0,020	38,62	38,51
Управление 5	1,2	68.24	3.163	65.07	22.62	1,42	46,93	0,414	46,52	40,77

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{me} &= \int_0^{t_{n,p}} \Delta P_{me} \cdot dt, \\ \Delta W_{cm} &= \int_0^{t_{n,p}} \Delta P_{cm} \cdot dt, \quad \Delta W_k = \int_0^{t_{n,p}} \Delta P_k \cdot dt \end{aligned} \right\}, \quad (47)$$

представлены для оптимальных значений времен намагничивания и размагничивания СМ в табл.2.

По результатам расчета энергетических: $\Delta P_{cm}(t)$, $\Delta P_k(t)$, $\Delta P_{\sigma}(t)$, $\Delta W_{n,p}(t)$ и электромагнитных: $i_f(t)$, $u_f(t)$, $e_{me}(t)$, $\Psi_{kd}(t)$, $i_{kd}(t)$ переходных процессов для режимов намагничивания и размагничивания СМ построены (при оптимальных для них значениях времен) графические зависимости этих процессов на рис.4. При этом текущие значения электрических потерь мощности $\Delta P_{\sigma}(t)$, $\Delta P_{cm}(t)$ и потерь мощности $\Delta P_k(t)$ для ее демпферной обмотки определялись из выражений (8), (9) и (12), а ЭДС e_{me} тиристорного возбудителя и напряжение u_f на клеммах обмотки возбуждения СМ рассчитывались в виде:

$$\left. \begin{aligned} e_{me} &= n \cdot U_{2p} + R_{me} \cdot i_f + L_{\phi} \cdot i'_f + u_f, \\ u_f &= 2 \cdot \Delta U_{\omega} + R_f \cdot i_f + (\Psi'_{ad} + L_{\sigma f} \cdot i'_{f1}) / k_{np}. \end{aligned} \right\} (48)$$

По результатам проведенного расчета электромагнитных процессов для управления 1 – 5 определены: зависимости наибольших значений $i_{kd.m}$ токов демпферной обмотки СМ от длительности времен t_n и t_p в режимах ее намагничивания и размагничивания, а также зависимости конечных (наибольших) значений $i_f(t_n)$ тока возбуждения этой машины при режиме намагничивания, – которые приведены в виде графиков на рис.5 и рис.6 соответственно.

Применительно к режимам размагничивания СМ с управлением 4 и 5 были рассчитаны из соотношения

$$\chi = T_m / t_p \quad (49)$$

значения коэффициента χ , характеризующего собой отношение постоянной времени T_m замкнутого контура регулирования тока возбуждения к длительности времени t_p размагничивания СМ. Под последним будем понимать, учитывая экспоненциальный вид изменения главного потокосцепления $\Psi_{ad}(t)$ при размагничивании, время снижения данного потокосцепления от $\Psi_{ad}(0)$ до $0,01 \Psi_{ad}(0)$. Рассчитанные зависимости для указанного коэффициента от длительно-

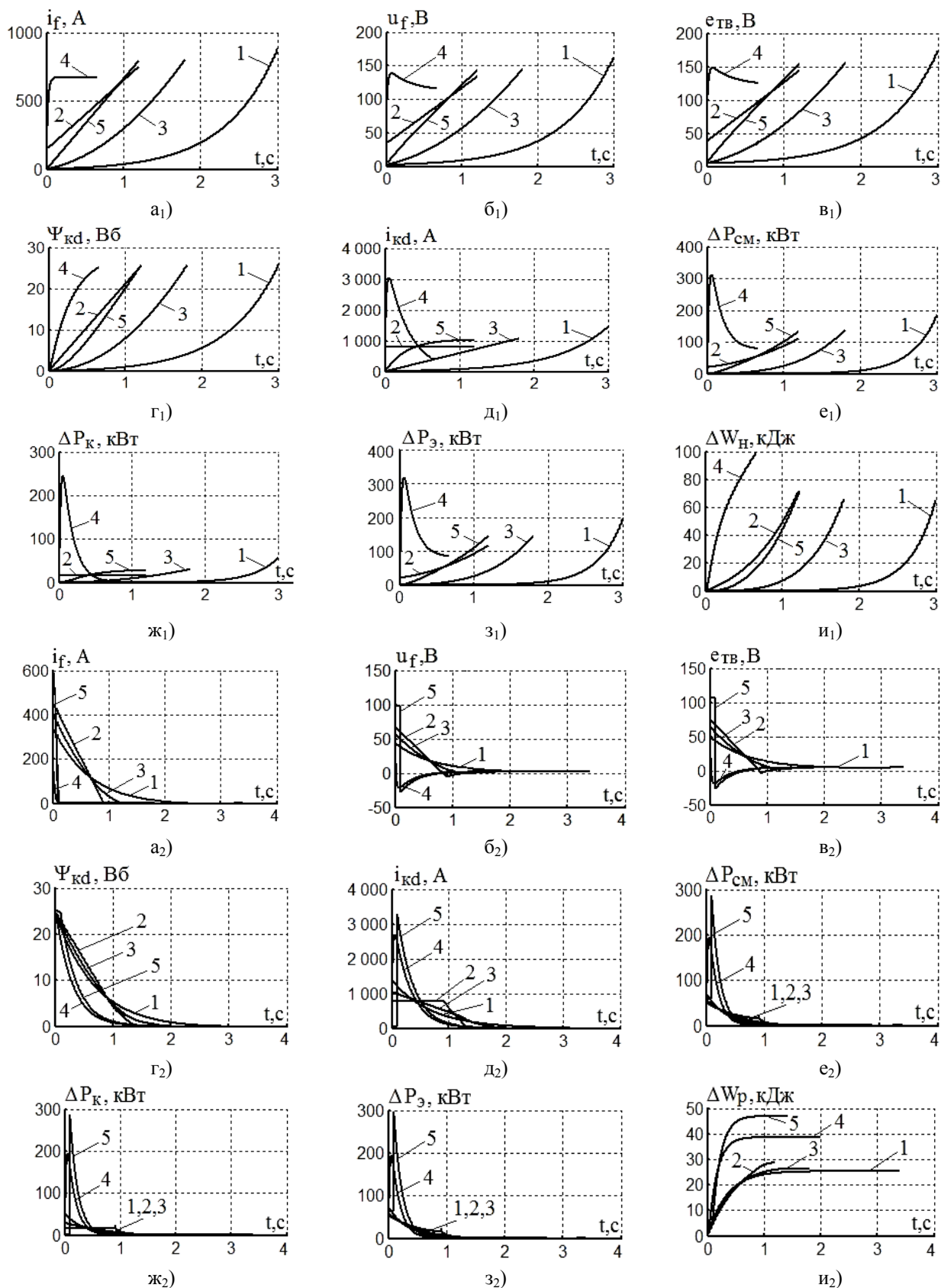


Рисунок 4. Электромагнитные и энергетические переходные процессы при намагничивании (а₁-и₁) и размагничивании (а₂-и₂) СМ при оптимальных длительностях времен t_n и t_p для управления 1, 2, 3, 4 и 5

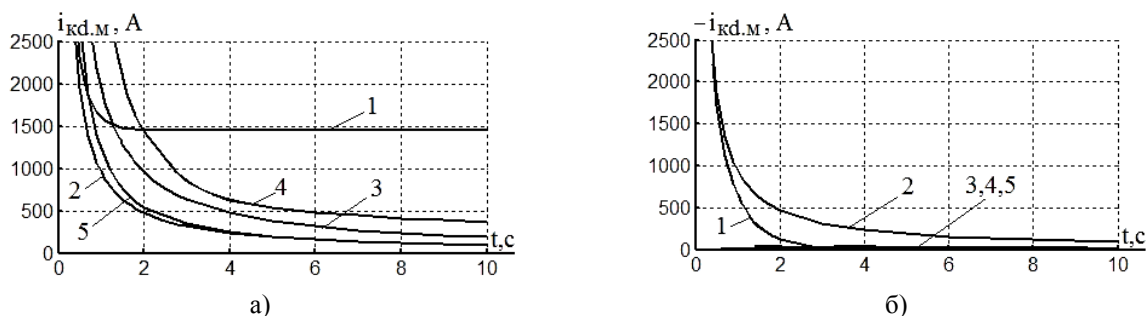


Рисунок 5. Наибольшие текущие значения тока демферной обмотки при намагничивании (а) и размагничивании (б) СМ для управления 1, 2, 3, 4 и 5

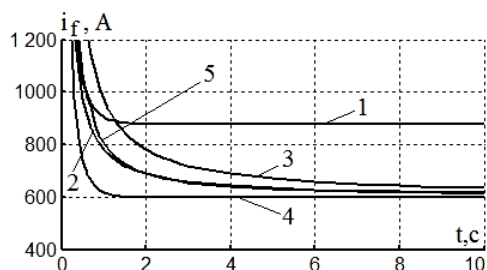


Рисунок 6. Зависимость тока возбуждения $i_f(t_n)$ при намагничивании для управления 1, 2, 3, 4 и 5

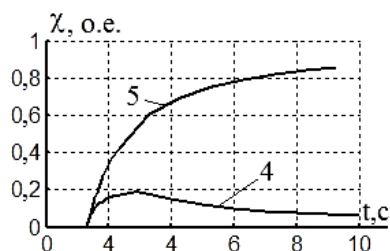


Рисунок 7. Зависимости $\chi(t_p)$ для управления 4, 5

сти времени t_p размагничивания показаны в виде графиков на рис.7.

В. ВЫВОДЫ

1. Разработанные схемы замещения (представленные на рис.1 и рис.2) и выполненный на их основе анализ позволили получить аналитическую зависимость (24) для расчета текущих значений общих электрических потерь мощности в системе «ТВ – остановленная СМ» при режимах намагничивания и размагничивания. Полученная зависимость (24), в свою очередь, позволяет с использованием методов вариационного исчисления определить оптимальные временные функции (32) и (40) для изменения потокосцепления $\Psi_{kd}(t)$ демферной обмотки и тока возбуждения $i_f(t)$ СМ при режимах намагничивания и размагничивания, обеспечивающие в этих режимах минимизацию ОПЭ в системе «ТВ – остановленная СМ».

2. Установлен для всех рассмотренных видов управления «U»-образный вид (на рис.3) зависимо-

стей ОПЭ для системы «ТВ – остановленная СМ» от длительности времен намагничивания и размагничивания. При любых заданных длительностях времен намагничивания и размагничивания наименьшие значения ОПЭ соответствуют предложенному оптимальному управлению, а наибольшие – управлению 4.

3. Выявлено, что посредством отработки конечных значений $\Psi_{kd}(t_n)$ и $\Psi_{kd}(0)$ потокосцеплений демферной обмотки согласно выражениям (34) и (35) обеспечивается при режиме намагничивания и размагничивания остановленной СМ, в свою очередь, отработка заданных значений $\Psi_{ad}(t_n)$ и $\Psi_{ad}(0)$ главного потокосцепления этой машины.

4. Из анализа зависимостей для максимальных значений токов демферной обмотки $i_{kd.m}$ на рис.5 и токов обмотки возбуждения $i_f(t_n)$ на рис.6, а также соответствующих оптимальному управлению электромагнитных и энергетических процессов в системе «ТВ – остановленная СМ», изображенных на рис.3, следует, что все они на практике реализуемы при оптимальных временах намагничивания и размагничивания, поскольку находятся в диапазоне допустимых для них рабочих значений.

5. Исходя из заданной длительности времени t_p намагничивания СМ и представленных на рис.7 зависимостей для коэффициента χ , достигается возможность при управлении 4 и 5 определить в виде: $T_m = \chi \cdot t_p$ требуемое значение постоянной времени T_m для контура регулирования тока возбуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Электрическая часть электростанций: учебник для вузов / С.В. Усов, Б.Н. Михалев, А.К. Черновец и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 616с.
 [2] Синюгин, В.Ю. Гидроаккумулирующие электростанции в современной энергетике / В.Ю. Синюгин, В.И. Магрук, В.Г. Родионов. – М.: ЭНАС, 2008. – 352с.
 [3] Павлов, Г.М. Автоматика энергосистем / Г.М. Павлов, Г.В. Меркурьев. – СПб: РАО «ЕЭС России». – 2001. – 387с.

- [4] Бесчастнов, Г.А. Расчёт процесса пуска обратимого агрегата ГАЭС от статического преобразователя частоты / Г.А. Бесчастнов, А.М. Карпов, Т.М. Нэмени, Г.С. Семёнова // *Электричество*. – 1980. – № 3. – С. 15-19.
- [5] Петелин, Д.П. Автоматическое управление синхронными электроприводами / Д.П. Петелин. – М.: Энергия, 1968. – 192с.
- [6] Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод / А.М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224с.
- [7] Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии / И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1973. – 400с.
- [8] Волков, В.А. Совершенствование частотного пуска гидроагрегата гидроаккумулирующей электростанции в насосном режиме / В.А. Волков, Д.В. Довбищук // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2015. – № 1. – С.55 – 61.
- [9] Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: «Юрайт», 2011. – 767с.
- [10] Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256с.
- [11] Чиженко, И.М. Основы преобразовательной техники / И.М. Чиженко, В.С. Руденко, В.И. Сенько. – М.: Высш. шк., 1974. – 430с.
- [12] Большам, Я.М. Справочник по проектированию электропривода силовых и осветительных установок / Я.М. Большам, В.И. Крупович, М.Л. Самовер. – М.: Энергия, 1974. – 728с.
- [13] Петров, Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1977. – 280с.
- [14] Тиховод, С.М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений состояния магнитоэлектрических схем замещения / С.М. Тиховод // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2015. – № 1. – С.30 – 46. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-8>
- [15] Тиховод, С.М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С.М. Тиховод, Т.М. Корнус, Д.Г. Паталах // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2015. – № 2. – С.48 – 54. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-7>

Стаття надійшла до редакції 09.05.2018

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ НАМАГНІЧУВАННЯ І РОЗМАГНІЧУВАННЯ ЗУПИНЕНОЇ ТРИФАЗНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ

ВОЛКОВ В.О.

канд. техн. наук, докторант Національного гірничого університету, г. Дніпро, Україна, e-mail: green_stone@ukr.net

Мета роботи. Дослідження і оптимізація (мінімізація) електричних втрат енергії в зупиненій синхронній машині з тиристорним збудником при режимах її намагнічування і розмагнічування.

Методи дослідження. Операторний і варіаційного числення, математичного аналізу та імітаційного комп'ютерного моделювання.

Отримані результати. Розроблено математичний опис досліджуваної системи: «тиристорний збудник – зупинена синхронна машина», який представляє собою аналітичні залежності для електромагнітних процесів, а також загальних втрат потужності і енергії в зазначеній системі при режимах намагнічування і розмагнічування синхронної машини. Методом варіаційного обчислення визначені оптимальні часові функції для зміни потужності демпферної обмотки і струму збудження зупиненої синхронної машини, при яких мінімізуються втрати енергії в досліджуваній системі при намагнічуванні і розмагнічуванні даної машини. Розраховані залежності загальних втрат енергії в досліджуваній системі від тривалості часів намагнічування і розмагнічування машини, а також виконано їх порівняння при різних видах (лінійному, параболічному і запропонованому оптимальному) траєкторій зміни заданого потужності, а також при лінійному і експоненційному зміні струму збудження машини. Отримано аналітичні залежності, з використанням яких виконані розрахунки електромагнітних і енергетичних перехідних процесів в системі «тиристорний збудник – зупинена синхронна машина» при розглянутих видах змін потужності і струму збудження машини.

Наукова новизна. Полягає в знаходженні оптимальних траєкторій зміни в часі струму збудження зупиненої синхронної машини і оптимальних тривалостей часів її намагнічування і розмагнічування, що забезпечують мінімізацію втрат енергії в системі «тиристорний збудник – зупинена синхронна машина».

Практична цінність. Полягає в зниженні непродуктивних втрат енергії в синхронних генераторах і двигунах при режимах їх намагнічування і розмагнічування.

Ключові слова: синхронна машина; режими намагнічування і розмагнічування; втрати електричної енергії; оптимізація.

OPTIMIZATION OF MAGNETIZATION AND MAGNETION REGIMES OF STOPPED THREE-PHASE SYNCHRONOUS MACHINE

VOLKOV V.A. PhD., Associate Professor, Doctoral Candidate of National Mining University, Dnepr, Ukraine, e-mail: green_stone@ukr.net

Purpose. Investigation and optimization (minimization) of electric energy losses in a stopped synchronous machine with a thyristor exciter under conditions of its magnetization and demagnetization.

Methodology. Operator and variational calculus, mathematical analysis and simulation computer simulation.

Findings. The mathematical description of the system under study is developed: "thyristor exciter – stopped synchronous machine", which represents the analytical dependencies for electromagnetic processes, as well as the total power and energy losses in the system under magnetization and demagnetization regimes of the synchronous machine. The optimal time functions for changing the flux linkages of the damper winding and the excitation current of the stopped synchronous machine, in which they are minimized by energy in the system under investigation when the machine is magnetized and demagnetized. The dependences of the total energy losses in the system under study on the durations of the magnetization and demagnetization times of the machine are calculated, and their comparison is compared for different types (linear, parabolic and proposed optimal) of the trajectories of the change of the linkage, as well as for a linear and exponential change in the excitation current of the machine. Analytic dependencies are obtained using the calculations of electromagnetic and energy transient processes in the "thyristor exciter – stopped synchronous machine" system under the considered types of variation of flux linkage and excitation current of the machine.

Originality. It consists in finding the optimal trajectories of the time variation of the excitation current of a stopped synchronous machine and the optimal durations of its magnetization and demagnetization times, which ensure minimization of energy losses in the system "thyristor exciter – stopped synchronous machine".

Practical value. It consists in reducing unproductive energy losses in synchronous generators and motors under the conditions of their magnetization and demagnetization.

Keywords: synchronous machine; modes of magnetization and demagnetization; loss of electrical energy; optimization.

REFERENCES

- [1] Usov, S.V., Mikhalev, B.N., Chernovets, A.K. (1987). Elektricheskaya chast elektrostantsiy. Leningrad, Energoatomizdat, 616.
- [2] Sinyugin, V.YU., Magruk, V.I., Rodionov, V.G. (2008). Gidroakkumuliruyushchiye elektrostantsii v sovremennoy energetike. M. ENAS, 352.
- [3] Pavlov, G.M., Merkur'yev, G.V. (2001). Avtomatika energosistem. SPb. RAO «YEES Rossii», 387.
- [4] Beschastnov, G.A., Karpov, A.M., Nemeni, T.M., Semonova, G.S. (1980). Raschot protsessy pusk obratimogo agregata GAES ot staticheskogo preobrazovatelya chastoty [Calculation of the start-up process of a reversible PSPS unit from a static frequency converter]. *Elektrichestvo*, 3, 15-19 (in Russian).
- [5] Petelin, D.P. (1968). Avtomaticheskoye upravleniye sinkhronnymi elektroprivodami. M. Energiya, 192.
- [6] Veynger, A.M. (1985). Reguliruyemyy sinkhronnyy elektroprivod. M. Energoatomizdat, 224.
- [7] Kopylov, I.P. (1973). Elektromekhanicheskiye preobrazovateli energii. M. Energiya, 400.
- [8] Volkov, V., & Dovbischuk, D. (2015). Improvement of frequency start of hydroelectric pumped storage power plant in the pumping mode. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 55-61. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-10
- [9] Kopylov, I.P., Klovok, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. (2011). Proyektirovaniye elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov. M. «Yurayt», 767.
- [10] Braslavskiy, I.YA., Ishmatov, Z.SH., Polyakov, V. N. (2004). Energoberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod. M. Akademiya, 256.
- [11] Chizhenko, I.M., Rudenko, V.S., Sen'ko, V.I. (1974). Osnovy preobrazovatelnoy tekhniki. M. V.shk., 430.
- [12] Bolsham, YA.M., Krupovich, V.I., Samover, M.L. (1974). Spravochnik po proyektirovaniyu elektroprivoda silovykh i osvetitelnykh ustanovok. M. Energiya, 728.
- [13] Petrov, YU.P. (1977). Variatsionnyye metody teorii optimalnogo upravleniy. Leningrad. Energiya, 280.
- [14] Tykhovod, S. (2015). Improvement of iterative methods of the nonlinear systems solution of state equations of magnetoelectric equivalent schemes. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 46-49. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-8
- [15] Tykhovod, S., Kornus, T., & Patalakh, D. (2015). Method of accelerated numerical calculation of transients in electrical circuits based on solution approximation by algebraic polynomials. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 48-54. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-7