

УДК 621.313.333.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЁХФАЗНЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ЭЛЕКТРОВОЗЕ 2ЭС5К В УСЛОВИЯХ АСИММЕТРИЧНОГО ПИТАНИЯ

А.С. Гирник, О.Л. Рапопорт

Томский политехнический университет
E-mail: AndreySG@mail2000.ru

Рассмотрено влияние несимметрии и гармоник питающего напряжения на работу вспомогательных двигателей. Показано влияние качества заливки обмотки ротора на перегрев машины. Сделаны выводы о необходимости улучшения условий электропитания таких агрегатов. Коэффициент несимметрии напряжений и уровень гармоник питания должны быть значительно ниже соответственно 2 и 19 %.

Ключевые слова:

Вспомогательный двигатель, электровоз, несимметрия, гармоники.

Вспомогательные трёхфазные электрические машины (ВТЭМ), используемые для охлаждения тяговых электродвигателей на электровозах, отличаются низкой надёжностью. Это подтверждает статистика заказов на внеплановый ремонт по вине вспомогательных машин ОАО «РЖД», из которой следует, что число таких заказов возросло с 2003 г. (575) по 2006 г. (873) почти в два раза. В 2007 г. только в одном депо г. Нижнеудинск количество отказов составило более 130, при этом в 30 двигателях наблюдалось выплавление алюминия обмотки. Это вызывает значительные убытки и естественно требует анализа причин отказов, а также исследования влияния их на работу ВТЭМ.

Одной из причин выхода из строя вспомогательных двигателей является несимметрия питающего напряжения на борту локомотива. Эта несимметрия вызвана тем, что ВТЭМ питается через рас-

щепитель фаз, который представляет собой конденсатор, включенный между двумя выводами питания двигателя. Таким образом, два фазовых провода, при соединении в звезду, подключаются к однофазной сети, а третий его провод подключается через конденсатор к соседней фазе. При таком подсоединении двигателя имеет место амплитудная и фазовая несимметрии. Другой причиной отказов может быть некачественная технология изготовления роторов, что также приводит к несимметрии токов в обмотках статора и ротора ВТЭМ.

В настоящей работе представлены результаты математического моделирования влияния возникающей несимметрии токов на свойства вспомогательных электрических машин. Исследования проводились с помощью структурной схемы асинхронного двигателя, приведенной на рис. 1 и построенной на основании базовых соотношений [1].

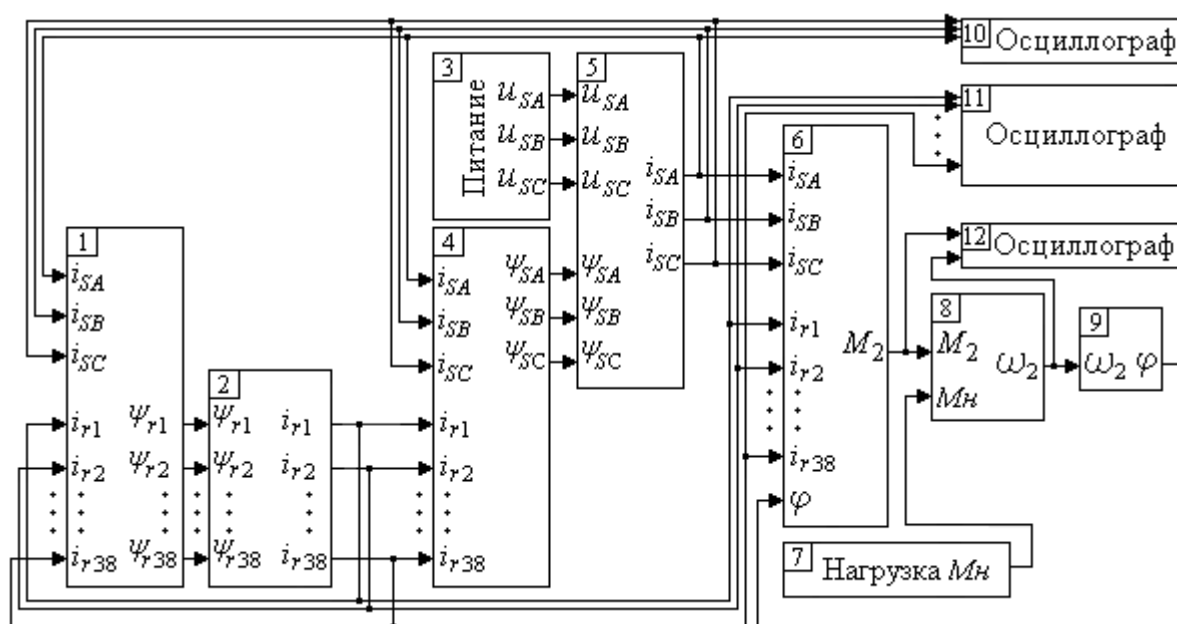


Рис. 1. Структурная схема асинхронного двигателя

На схеме приведены следующие обозначения: u_{SA}, u_{SB}, u_{SC} – питающие фазные напряжения статора; i_{SA}, i_{SB}, i_{SC} ; $\psi_{SA}, \psi_{SB}, \psi_{SC}$ ($i_{r1}, i_{r2}, \dots, i_{r38}$; $\psi_{r1}, \psi_{r2}, \dots, \psi_{r38}$) – токи и потокосцепления фаз статора (ротора); M_2 – вращающий момент на валу двигателя; M_H – момент нагрузки; φ и ω_2 – угол поворота и частота вращения ротора.

Данная схема разделена на блоки, работа которых представляется уравнениями в фазных координатах (математической моделью), приведёнными ниже.

Работа блока 1, предназначенного для вычисления потокосцеплений фаз ротора, описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \psi_{r1} &= i_{r1}(L_{2\sigma} + L_m) + L_m \sum_{k=2}^{m_2} i_{rk} \cos\left((k-1)\frac{360^\circ}{m_2}\right) + \\ &+ L_m (i_{SA} \cos(-\varphi) + i_{SB} \cos(-\varphi + 120^\circ) + \\ &+ i_{SC} \cos(-\varphi + 240^\circ)); \\ \dots\dots\dots \\ \psi_{r38} &= i_{r38}(L_{2\sigma} + L_m) + L_m \sum_{k=1}^{m_2-1} i_{rk} \cos\left(k\frac{360^\circ}{m_2}\right) + \\ &+ L_m \left(i_{SA} \cos\left(-\varphi - (m_2-1)\frac{360^\circ}{m_2}\right) + \right. \\ &+ i_{SB} \cos\left(-\varphi + 120^\circ - (m_2-1)\frac{360^\circ}{m_2}\right) \\ &+ \left. i_{SC} \cos\left(-\varphi + 240^\circ - (m_2-1)\frac{360^\circ}{m_2}\right) \right), \end{aligned}$$

где k и m_2 – номер стержня и число фаз ротора, равное 38; $L_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния ротора; L_m – взаимная индуктивность между статором и ротором.

Работу блока 2, предназначенного для вычисления токов ротора, опишем системой уравнений:

$$\begin{aligned} 0 &= i_{r1}R_2' + \frac{d\psi_{r1}}{dt}; \\ 0 &= i_{r2}R_2' + \frac{d\psi_{r2}}{dt}; \\ \dots\dots\dots \\ 0 &= i_{r38}R_2' + \frac{d\psi_{r38}}{dt}, \end{aligned}$$

где R_2' – приведённое сопротивление фазы ротора; t – время.

Блок 3 представляет собой источник питания с варьируемым уровнем гармоник.

Работа блока 4, предназначенного для вычисления потокосцеплений статора, характеризуется как:

$$\begin{aligned} \psi_{SA} &= i_{SA}(L_{1\sigma} + L_m) - \frac{1}{2}i_{SB}L_m - \frac{1}{2}i_{SC}L_m + \\ &+ L_m \sum_{k=1}^{m_2} i_{rk} \cos\left(\varphi + (k-1)\frac{360^\circ}{m_2}\right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_{SA} &= i_{SA}(L_{1\sigma} + L_m) - \frac{1}{2}i_{SB}L_m - \frac{1}{2}i_{SC}L_m + \\ &+ L_m \sum_{k=1}^{m_2} i_{rk} \cos\left(\varphi + (k-1)\frac{360^\circ}{m_2}\right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_{SB} &= i_{SB}(L_{1\sigma} + L_m) - \frac{1}{2}i_{SC}L_m - \frac{1}{2}i_{SA}L_m + \\ &+ L_m \sum_{k=1}^{m_2} i_{rk} \cos\left(\varphi + (k-1)\frac{360^\circ}{m_2} - 120^\circ\right); \end{aligned}$$

где $L_{1\sigma}$ – индуктивность от полей рассеяния статора.

Работу блока 5, предназначенного для вычисления токов статора, можно описать уравнениями:

$$\begin{aligned} \sum_{v=1,3,5,7} (u_{SAv} \sqrt{2} \sin(v\omega_0 t)) &= i_{SA} R_1 + \frac{d\psi_{SA}}{dt}; \\ \sum_{v=1,3,5,7} (u_{SBv} \sqrt{2} \sin(v\omega_0 t - 120^\circ)) &= i_{SB} R_1 + \frac{d\psi_{SB}}{dt}; \\ \sum_{v=1,3,5,7} (u_{SCv} \sqrt{2} \sin(v\omega_0 t - 240^\circ)) &= i_{SC} R_1 + \frac{d\psi_{SC}}{dt}, \end{aligned}$$

где v – номер гармоники питающего напряжения; $u_{SAv}, u_{SBv}, u_{SCv}$ – напряжения питания статора; ω_0 – угловая частота питающей сети первой гармоники; R_1 – сопротивление фазы статора.

Работа блока 6, предназначенного для вычисления крутящего момента, выразим следующим образом:

$$M_2 = -L_m p \sum_{n=A,B,C} i_{Sn} \sum_{k=1}^{m_2} i_{rk} \sin \alpha_{nk},$$

где p – число пар полюсов; n – номер фазы статора; α_{nk} – угол поворота фазы ротора относительно фазы статора; i_{Sn} и i_{rk} – токи фаз статора и ротора.

Блок 7 имитирует механическую нагрузку на валу двигателя, которая в данных исследованиях была принята равной 360 Н·м.

Работа блока 8, предназначенного для вычисления угловой частоты вращения ротора, запишем как:

$$\omega_2 = \frac{p}{J} \int_0^t (M_2 - M_H) dt,$$

где J – момент инерции ротора.

Работа блока 9, предназначенного для вычисления угла поворота ротора, характеризуется выражением:

$$\varphi = \int_0^t \omega_2 dt.$$

Блоки 10, 11 и 12 представляют собой осциллографы с числом входных каналов 3, 38 и 2, соответственно.

Для имитации некачественно залитых стержней сопротивления обмоток дефектных фаз ротора R_2' принимались равными бесконечности.

Все величины в схеме приведены в абсолютных единицах. Вычисления проводились с использова-

нием программной среды SIMULINK пакета MATLAB 6. В расчётах приняты следующие допущения:

- погрешность расчёта – в пределах 5 %;
- взаимные индуктивности от полей рассеяния не учитывались в силу их малости, поскольку эти поля замыкаются по воздуху;
- учитывалось наведение ЭДС чётных гармоник в роторе от полей нечётных гармоник статора прямой последовательности, а также от поля статора обратной последовательности только для первой гармоники;
- влияние полей нечётных высших гармоник обратной последовательности не учитывалось по причине их малости.

Для расчёта использовали параметры применяемого на электровозах двигателя НВА-55 мощностью 55 кВт, рассчитанные в соответствии с рекомендациями работы [2]: синхронная частота вращения 1500 об/мин; активные сопротивления фазы статора и ротора $R_1=0,045$ Ом и $R_2=0,064$ Ом; индуктивности от полей рассеяния фазы статора и ротора $L_{\sigma 1}=380$ мкГн и $L_{\sigma 2}=500$ мкГн; взаимные индуктивности фаз статора и ротора $L_m=10$ мГн; число фаз ротора $m_2=38$; число пар полюсов $p=2$; момент инерции ротора вместе с моментом инерции приводного механизма 1 кг·м²; номинальное 3-фазное напряжение питания 380/220 В, 50 Гц. Схема соединения обмоток – «звезда».

В ходе исследований использовали информацию по фактическому качеству питающего напряжения, измеренному на зажимах ВТЭМ № 1 при ходовых испытаниях электровоза 2ЭС5К № 031. Было зафиксировано, что значения коэффициентов несимметрии по напряжениям составляли от 2 до 16 % [3]. Для номинального симметричного режима напряжение всех фаз было принято равным 220 В; взаимные фазные углы составляли 120°. Учитывали влияние гармонических составляющих, из числа которых наиболее выраженными являлись 3-я, 5-я и 7-я гармоники питающего напряжения. Гармоники более высшего порядка не учитывались в силу их малости. В исследованиях использовали данные по двум вариантам несимметричного питания. В первом варианте (штатный режим) коэффициент несимметрии составлял 2 %, а суммарный уровень гармоник до 26 %, и во втором варианте (самый тяжёлый режим с повышенной несимметрией питания) коэффициент несимметрии 16 %, а уровень гармоник до 19 %. Напряжения фаз по каждому варианту для входящих в расчет гармоник представлены в табл. 1.

С целью исследования влияния приведённых выше режимов питания, как наиболее вероятных, на тепловое состояние изоляции статора и обмотки ротора были проведены численные расчеты электрических потерь мощности и температур. Эти результаты представлены в табл. 2.

Таблица 1. Напряжения питания двигателя

Номер гар- моники	Напряжения фаз, В			Начальные углы фаз, град		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Вариант несимметрии питания 1						
1	235	232	241	0	118,5	238,5
3	26,4	22,0	6,6			
5	44,0	4,4	28,6			
7	17,6	4,4	15,4			
Вариант несимметрии питания 2						
1	112	187	202	0	115	250
3	20,0	16,6	5,0			
5	33,3	3,3	21,3			
7	13,3	3,3	11,6			

Таблица 2. Данные расчётов для разных режимов работы двигателя

Величина	Номинальный режим	Наличие всех вы- сших гармоник по вариантам		Несимметрия пи- тания 1 с учётом гармоник		Несимметрия пи- тания 2 с учётом гармоник	
		1	2	1	1, 3, 5 и 7	1	1, 3, 5 и
Электрические потери статора, Вт							
Потери от 1 гармоник	1545	1545	1545	1300	1300	4940	4940
Потери от 3 гармоник	0	280	70	0	280	0	70
Потери от 5 гармоник	0	244	68	0	244	0	68
Потери от 7 гармоник	0	25	6	0	25	0	6
Суммарные потери	1545	2094	1689	1300	1850	4940	5084
Электрические потери ротора, Вт							
Потери от основного тока ротора	1520	1520	1520	1520	1520	3810	3810
Потери от 2 гармоник	0	110	67	145	255	3780	3847
Потери от 4 гармоник	0	110	54	0	110	0	54
Потери от 6 гармоник	0	12	6	0	12	0	6
Суммарные потери	1520	1752	1647	1665	1897	7590	7717
Температура изоляции статора t_s , °C							
t_s , °C	140	170	148	154	184	370	378
t_s , %	100	121	105	110	131	265	270
Температура стержня ротора t_r , °C							
t_r , °C	145	170	156	152	182	354	362
t_r , %	100	117	107	105	125	244	250

В данных исследованиях электрические потери рассчитывались как произведение квадрата тока, протекающего через фазу обмотки статора или ротора, на сопротивление обмотки соответственно фазы статора или ротора. Затем полученные значения фазных потерь складывались. Результаты расчёта токов в данной работе не приводятся по причине их большого количества.

Приведенные в табл. 2 результаты можно объяснить следующим образом. При наличии высших гармоник в питающем напряжении в роторе наводится дополнительная ЭДС. В этом случае из-за вращения ротора наведенные ЭДС имеют частоты на 50 Гц ниже возбуждающей. Т. е. частота наводимой гармоники будет выражаться как $f=f_1 \cdot (\nu-1)$. Физически это объясняется тем, что ротор стре-

мится догнать поле возбуждающей гармоники. В этом случае частота наведённой в роторе ЭДС будет равна разности частот дополнительной гармоники и основной. Наведенные гармоники создают потери, приводящие к дополнительному нагреву, что может пагубно влиять на работу двигателя. Несимметрия питания вызывает перекося токов в обмотке статора. Возникающая при этом несимме-

тричность вращающегося поля статора за счёт поля обратной последовательности наводит в обмотке ротора ЭДС 2-й гармоники.

Кроме того, в результате расчетов были получены численные значения потерь мощности и температур при возможном обрыве обмотки или некачественном изготовлении стержней ротора при разных режимах, рис. 2.

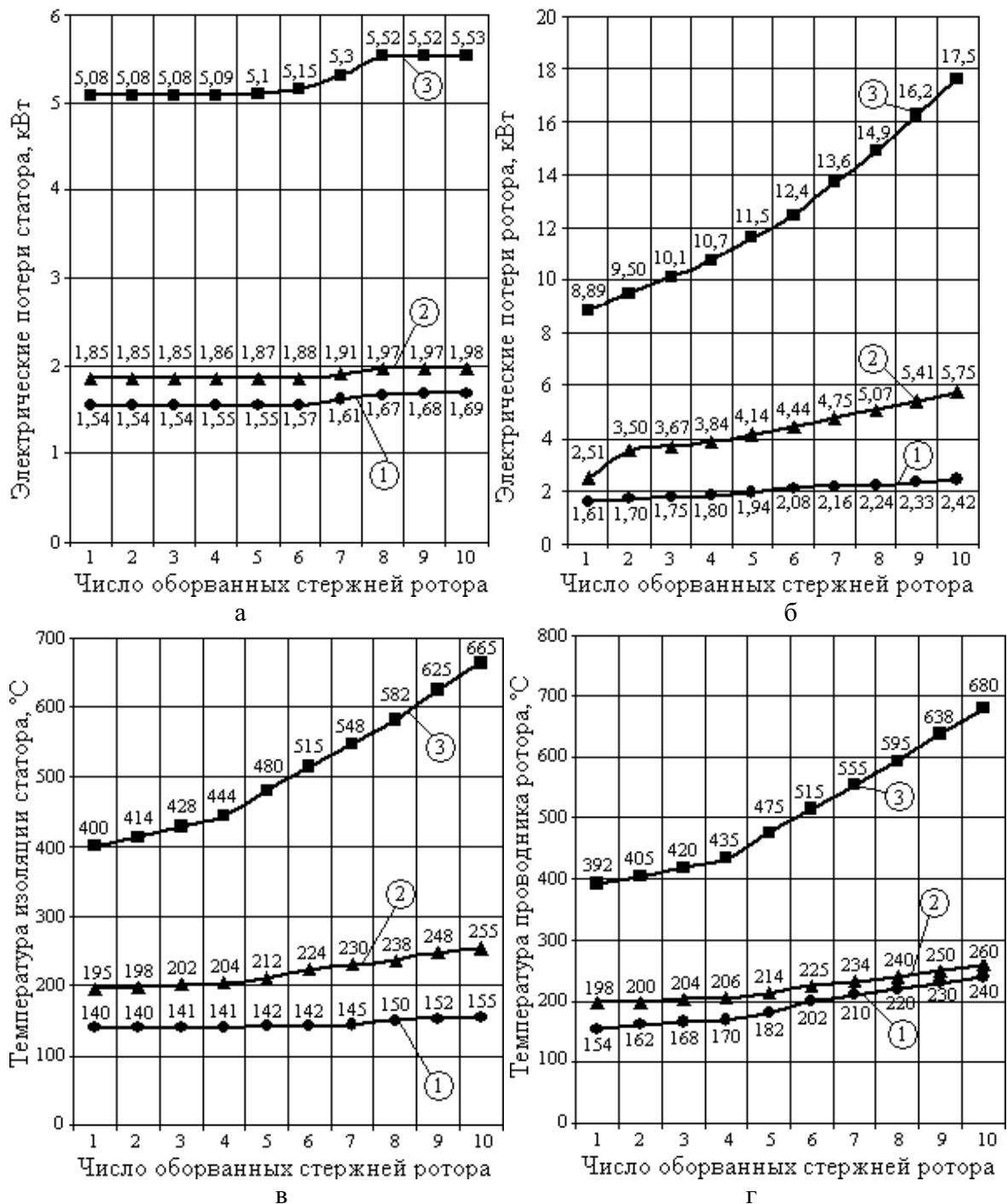


Рис. 2. Диаграммы: а) и б) электрических потерь статора (а) и ротора (б); в) и г) температур изоляции статора (в) и проводника ротора (г); 1 – отсутствие несимметрии и высших гармоник питания; 2 – наличие всех гармоник при несимметрии питания по варианту 1; 3 – наличие всех гармоник при несимметрии питания по варианту 2

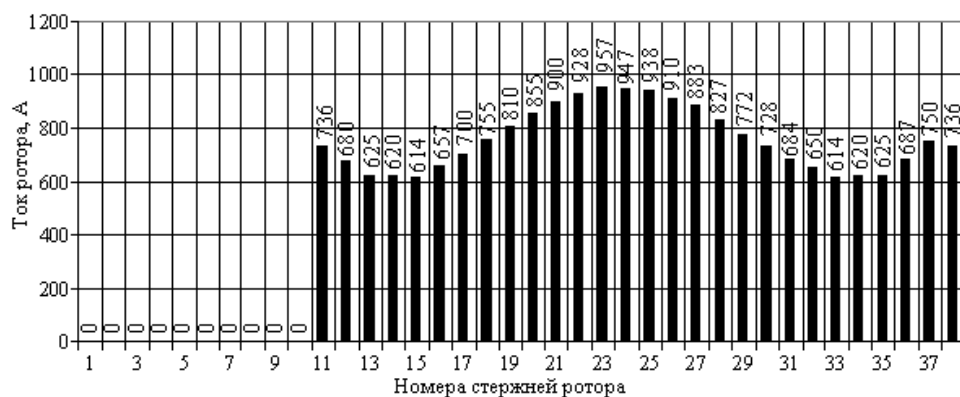


Рис. 3. Диаграмма токов ротора при обрыве 10-ти стержней без учета несимметрии питания и высших гармоник

Из анализа рисунков видно, что самым тяжёлым режимом работы двигателя является такой, при котором имеет место второй вариант несимметрии питания.

В качестве примера перекаса токов в роторе при обрыве 10-ти стержней приведена диаграмма на рис. 3. Номинальный ток ротора при номинальном симметричном режиме был равен 520 А.

Расчёт выше приведённых температур в данной работе был произведён в программной среде EL-CUT. Способ моделирования — метод конечных элементов. Моделирование тепловых полей проводилось с учётом следующих условий:

- учтены теплоотдача с поверхности статора и теплоотдача в воздушном зазоре за счёт движения в нём воздуха при вращении ротора;
- степень защиты двигателя — IP23;
- в качестве источников тепла учитывались отдельные области двигателя, которым присвоены соответствующие величины удельного тепловыделения;
- режим работы двигателя принят продолжительным (S1).

Величины удельного тепловыделения в отдельных областях двигателя напрямую зависят от тепловых потерь в той или иной области, а выделение тепла происходит не равномерно и зависит от несимметрии токов в статоре и роторе. Поэтому данные величины из-за их большого многообразия не приводятся. Кроме того, в приведённых выше ре-

зультатах расчёта использовались значения температур самых нагретых точек статора и ротора.

Выводы

1. При работе асинхронного вспомогательного двигателя электровоза при симметричном питании средняя температура изоляции паза статора достигает 140 °С, что допустимо для класса изоляции F (155 °С), используемой в данном типе машин (НВА-55).
2. При суммарном уровне гармоник до 19 % температура изоляции статора достигает 148 °С, а при уровне гармоник 26 % температура превышает допустимую (170 °С). При амплитудно-фазовой несимметрии питания до 2 % температура изоляции статора составляет 154 °С.
3. При одновременном наличии несимметрии до 16 % и гармоник до 19 %, а также дефектов не менее чем в десяти стержнях ротора происходит оплавление алюминия обмотки ротора (температура нагрева превышает температуру плавления алюминия).
4. Для повышения надежности вспомогательных машин электровозов необходимо принимать меры по улучшению качества их питания, а также технологии заливки роторов. Коэффициент несимметрии питания не должен превышать 2 %, а суммарный уровень гармоник 19 %. Этого можно достичь применением трёхфазных преобразователей частоты и индуктивных или ёмкостных фильтров.
3. Рапопорт О.Л., Харлов Н.Н., Волков М.В. Особенности режимов работы вспомогательных электрических машин электровозов серий ВЛ-85 и 2ЭС5К // Локомотив. — 2006. — Вып. 11. — С. 21–22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В. «Электрические машины». В 2-х т. Т. 1. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 652 с.: ил.
2. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. — М.: Высшая школа, 2002. — 757 с.: ил.

Поступила 3.12.2008 г.