

На правах рукописи



Гирник Андрей Сергеевич

**МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Томск – 2011

Работа выполнена на кафедре «Электромеханические комплексы и материалы ЭКМ» ФГБОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Научный руководитель: кандидат технических наук
Рапопорт Олег Лазаревич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Беспалов Виктор Яковлевич

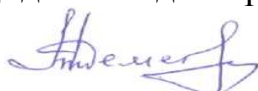
кандидат технических наук
Гусельников Андрей Эдуардович

Ведущая организация: Обособленное подразделение
«Научно-исследовательский институт
автоматики и электромеханики
Томского государственного
университета систем управления и
радиоэлектроники» НИИ АЭМ ТУСУР,
г. Томск.

Защита состоится «7» декабря 2011 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, аудитория 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автореферат разослан *02 ноября 2011 г.*

Учёный секретарь
совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11,
кандидат технических наук, доцент  Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Железнодорожный транспорт в транспортной системе страны всегда занимал и занимает особое место, обеспечивая бесперебойную доставку грузов практически во все регионы. Надёжное функционирование железной дороги способствует стабильности экономики и росту благосостояния государства.

Используемые в качестве тяговых средств, локомотивы являются наиболее ответственными элементами в системе железнодорожного транспорта, к надёжности которых предъявляются особые требования. Главным из последних является безотказность тягового электропривода.

В его состав входят тяговые электродвигатели (ТЭД), аппаратура управления ТЭД и вспомогательные электрические машины (ВЭМ), обеспечивающие требуемые условия работы ТЭД.

В современных локомотивах в качестве вспомогательных электрических машин применяют асинхронные двигатели. Эксплуатация этих машин на транспорте отличается от общепромышленных условий низким качеством напряжения, повышенной вибрацией, тяжелыми климатическими условиями. Поэтому транспортные электрические машины всегда составляют отдельную группу. В развитие теории их проектирования и эксплуатации большой вклад внесли выдающиеся учёные: А.Е. Алексеев, Б.Н. Красовский, М.Д. Находкин, В.А. Кучумов, А.С. Курбасов, Л.А. Курочкин, В.Т. Касьянов, В.П. Янов, В.И. Бочаров, М.Ф. Карасёв, В.С. Хвостов, А.Б. Иоффе, В.Е. Скобелев, Б.Н. Тихменёв, Б.К. Баранов, В.Д. Авилов, Ш.К. Исмаилов, Р.Ф. Бекишев и многие другие.

Асинхронные вспомогательные электрические машины (АВЭМ) выполняют функции приводов вентиляторов охлаждения ТЭД и резисторов, приводов компрессоров. Современные схемы управления ими построены либо на известной схеме расщепления фазы или на основе микропроцессорных систем.

Статистика отказов АВЭМ за последние годы показывает, что надёжность этих машин уменьшается. В особенной степени это проявляется на новых электровозах 2ЭС5К «Ермак», где число внеплановых ремонтов за последние годы увеличилось более чем в 2,5 раза из-за неисправностей АВЭМ. Эта проблема наиболее выражена при организации питания АВЭМ по конденсаторной схеме. Однако проявление неисправностей АВЭМ НВА-55 в виде выплавления алюминиевого сплава обмотки ротора требует выяснения причин возникновения потерь, приводящих к таким перегревам.

В условиях локомотива на качество работы трёхфазного асинхронного двигателя действует несколько факторов: несимметрия питающего напряжения, формируемого от однофазной сети; выбор конденсаторной схемы и качество её функционирования; качество проекта АВЭМ и технология изготовления.

Исследованию влияния этих факторов на энергетику машин по отдельности посвящены работы многих выдающихся учёных: А.И. Адаменко, А.И. Постников, И.Б. Башук, И.М. Булаев, А.И. Валиков, А.И. Вольдек, И.М.

Камень, М.А. Морозов, Е.М. Лопухина, А.С. Курбасов, Ю.С. Чечет и многие другие.

Однако в этих исследованиях нет убедительных доказательств того, что в реальных АВЭМ НВА-55 на реальных электровозах указанные выше факторы в отдельности могут вызвать потери, приводящие к выплавлению алюминия. Проявление этой неисправности является системным в течение нескольких последних лет и не устраняются применением отдельных мер со стороны производителя (например, заменой алюминиевого сплава клетки ротора на медные стержни) или со стороны железной дороги (контроль параметров конденсаторов).

Учитывая большие экономические потери, связанные с отказами сотен ВЭМ в течение года, проблема повышения качества этих машин, работающих в качестве вспомогательных на электровозах 2ЭС5К, является весьма актуальной.

Цель работы. Целью работы является системное исследование влияния факторов на качество работы асинхронных вспомогательных двигателей на локомотиве и разработка системы схемотехнических, конструкторских и технологических решений по устранению их отказов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Сделать анализ качества напряжения бортовой сети электровоза и оценить характер его воздействия при реализованных схемах управления на характеристики АВЭМ.

2. Разработать математическое описание и математические модели асинхронного вспомогательного двигателя для исследования работы при совместном действии несимметричного напряжения, наличии временных гармоник и технологических дефектов в стержнях обмотки ротора и исследовать их влияние на энергетические показатели АВЭМ.

3. Разработать математическую модель конденсаторного пуска асинхронного двигателя в группе других с питанием от однофазной сети для исследования изменения фазных токов и напряжений.

4. Модернизировать конструкцию активной части АВЭМ.

5. Разработать алгоритм и систему мониторинга теплового состояния вспомогательного асинхронного электродвигателя при эксплуатации на электровозе.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Получено математическое описание асинхронного двигателя отличающееся от известных ранее вариантов подробным рассмотрением совместного влияния качества питающего напряжения и дефектов стержней обмотки ротора на показатели машины.

2. Создана математическая модель АВЭМ, позволяющая исследовать особенности режимов при его пуске в группе с другими двигателями с питанием по конденсаторной схеме от однофазной сети.

3. Математическое моделирование группового включения вспомогательных асинхронных двигателей по конденсаторной схеме позволило определить возникающие при пуске броски токов и напряжений.

4. Разработан алгоритм и система мониторинга теплового состояния асинхронного АВЭМ при условиях эксплуатации на локомотиве.

Практическая ценность работы заключается в следующем.

1. Проведённые с использованием математической модели исследования позволили установить, что критический перегрев обмотки ротора возникает при совместном влиянии низкого качества напряжения питания и выраженной дефектности обмотки ротора.

2. Разработаны рекомендации по модернизации конструкции активной части АВЭМ, позволяющей снизить тепловую нагрузку.

3. Разработаны элементы конструкции активной части вспомогательного двигателя и проведён расчёт, показывающий возможность снижения тепловой нагрузки ротора не менее чем на 30%.

4. Разработана программа и предложена микропроцессорная система теплового мониторинга асинхронных двигателей при эксплуатации на подвижном составе.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель АВЭМ, позволяющая учитывать совместное влияние качества питающего напряжения и дефектов технологии изготовления обмотки ротора на энергетические показатели машины.

2. Математическая модель группового включения трёхфазных АВЭМ по конденсаторной схеме питания от однофазной сети.

3. Микропроцессорная система мониторинга теплового состояния и алгоритм её функционирования для вспомогательных асинхронных двигателей в условиях эксплуатации.

4. Экспериментальные исследования качества питающего напряжения на зажимах АВЭМ при их эксплуатации на электровозе 2ЭС5К.

5. Экспериментальные исследования для оценки адекватности математических моделей.

Методы исследований. Перечисленные в диссертационной работе задачи решаются методами теории электрических машин, численного моделирования и экспериментальных исследований в лабораторных условиях и в процессе натурных исследований.

В исследованиях использовались программные продукты: Matlab 7, Mathcad 14, Elcut 4.2т.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы в качестве рекомендаций на Новочеркасском электровозостроительном заводе «НЭВЗ» для производства АВЭМ. Разработанная в диссертационной работе экспериментальная установка для исследования работы асинхронного двигателя при несимметричном питании используется в учебном процессе Национального исследовательского Томского

политехнического университета при подготовке студентов бакалавров и магистров направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Апробация работы. Материалы исследования докладывались и получили одобрение на следующих конференциях.

1. XIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008г.).

2. XV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2009г.).

3. VI Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2009г.).

Кроме того, принималось участие в совещаниях по надёжности АВЭМ, проводимых вице-президентом ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем.

Публикации. Общее количество публикаций по теме диссертации – 7, из них: 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 4 работы опубликовано в трудах конференций, получено свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 176 страницах машинописного текста, содержит 64 иллюстраций, состоит из 4 глав, заключения, списка литературы из 107 наименований и 8 приложений.

Автор выражает благодарность научному консультанту Цукублину Анатолию Борисовичу за неоценимую помощь при работе с диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задач по исследованию работы вспомогательных асинхронных двигателей в условиях несимметричного и несинусоидального питания в группе АВЭМ от однофазной сети, а также вопросы модернизации данных машин. Сформулирована цель, поставлены основные задачи, описана научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, приведена краткая аннотация выполненной работы по разделам.

В первой главе приведён анализ особенностей конструкции и условий работы асинхронных вспомогательных двигателей электровозов. Приведены результаты экспериментальных исследований качества напряжения питания АВЭМ, полученные при ходовых испытаниях электровозов ВЛ-85, 2ЭС4К, 2ЭС5К. Показано, что качество питающего напряжения на зажимах АВЭМ не удовлетворяет требованиям ГОСТ по допустимой несимметрии и несинусоидальности напряжения. Уровень несимметрии питающего напряжения достигает 6,3%, а уровень гармоник может достигать 20%. Поставлено предположение о низком качестве изготовления роторов АВЭМ на основании проведённой ревизии результатов выплавки роторных клеток при эксплуатации вспомогательных двигателей. Проведён критический обзор существующих методов исследования асинхронных двигателей в условиях несимметричного и несинусоидального питания, а также несимметрии

роторной цепи машины. Проанализированы результаты работ, ранее сделанных по данной тематике. Поставлены основные задачи исследования.

Во второй главе разработана математическая модель, позволяющая исследовать работу асинхронного двигателя при наличии несимметричного питающего напряжения, высших временных гармоник питания и при наличии дефектов стержней ротора. Проверена адекватность разработанной математической модели и представлены результаты практического эксперимента. Проведены исследования режимов работы вспомогательных асинхронных двигателей в условиях несимметричного и несинусоидального напряжения питания при наличии дефектов в роторе с помощью разработанной математической модели. Сделаны выводы о необходимой модернизации конструкции вспомогательных машин.

Математическая модель для исследований реализована в программном продукте MATLAB 7.0 SIMULINK и записана через мгновенные фазные величины:

$$\left. \begin{aligned} U_{SA} \sqrt{2} \sin(\omega_1 t - \alpha_A^\circ) &= i_{SA} R_1 + \frac{d\psi_{\Sigma SA}}{dt}; \\ U_{SB} \sqrt{2} \sin(\omega_1 t - \alpha_B^\circ) &= i_{SB} R_1 + \frac{d\psi_{\Sigma SB}}{dt}; \\ U_{SC} \sqrt{2} \sin(\omega_1 t - \alpha_C^\circ) &= i_{SC} R_1 + \frac{d\psi_{\Sigma SC}}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &= i_{r1} R'_2 + \frac{d\psi_{\Sigma r1}}{dt}; \\ 0 &= i_{r2} R'_2 + \frac{d\psi_{\Sigma r2}}{dt}; \\ &\dots\dots\dots \\ 0 &= i_{r38} R'_2 + \frac{d\psi_{\Sigma r38}}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\Sigma SA} &= i_{SA} (L_{1\sigma} + L_m) - \frac{1}{2} i_{SB} L_m - \frac{1}{2} i_{SC} L_m + L_m \sum_{k=1}^{m_2} i_{rk} \cos\left(\varphi + (k-1) \frac{360^\circ}{m_2}\right); \\ \psi_{\Sigma SB} &= i_{SB} (L_{1\sigma} + L_m) - \frac{1}{2} i_{SC} L_m - \frac{1}{2} i_{SA} L_m + L_m \sum_{k=1}^{m_2} i_{rk} \cos\left(\varphi + (k-1) \frac{360^\circ}{m_2} - 120^\circ\right); \\ \psi_{\Sigma SC} &= i_{SC} (L_{1\sigma} + L_m) - \frac{1}{2} i_{SA} L_m - \frac{1}{2} i_{SB} L_m + L_m \sum_{k=1}^{m_2} i_{rk} \cos\left(\varphi + (k-1) \frac{360^\circ}{m_2} - 240^\circ\right); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для оценки адекватности данной математической модели при несимметричном и несинусоидальном питании проведён практический эксперимент на физической модели, представляющей собой совокупность системы питания, асинхронного двигателя АД80, нагрузочного генератора П-32 и измерительных приборов. При этом задавался различный уровень несимметрии питания при помощи однофазных регуляторов напряжения, подключённых к каждой фазе двигателя. Фазные напряжения и токи измерялись с помощью датчиков напряжения и токов, и эти данные подавались в электронное измерительное устройство, после чего обрабатывались на компьютере. Также учитывался и уровень высших временных гармоник, присутствующих в питающем напряжении. Рассчитывались электрические потери при несимметричном и несинусоидальном питании по фактически измеренным напряжениям и токам. Кроме того, проводилось моделирование тех же режимов работы двигателя на компьютере. Погрешность между экспериментальными и расчётными данными электрических потерь составляет не более 5%.

Для оценки адекватности математической модели при наличии дефектов в роторной клетке проводился практический эксперимент на заводе ОАО «Сибэлектромотор» с использованием испытательной станции. При этом проводились измерения фазных токов двигателя при медленном вращении ротора с высверленными 1-м, 2-мя и 3-мя стержнями. Те же режимы моделировались на компьютере, и погрешность расхождения экспериментальных и расчётных токов статора не превышает 8,2 %.

Пример результата моделирования работы АВЭМ НВА-55 при пяти дефектных стержнях с участками уменьшенного сечения приведён на рис. 1. При этом дефектный участок составляет по своей протяжённости 5% от длины всего стержня, а его площадь поперечного сечения уменьшена в 9 раз.

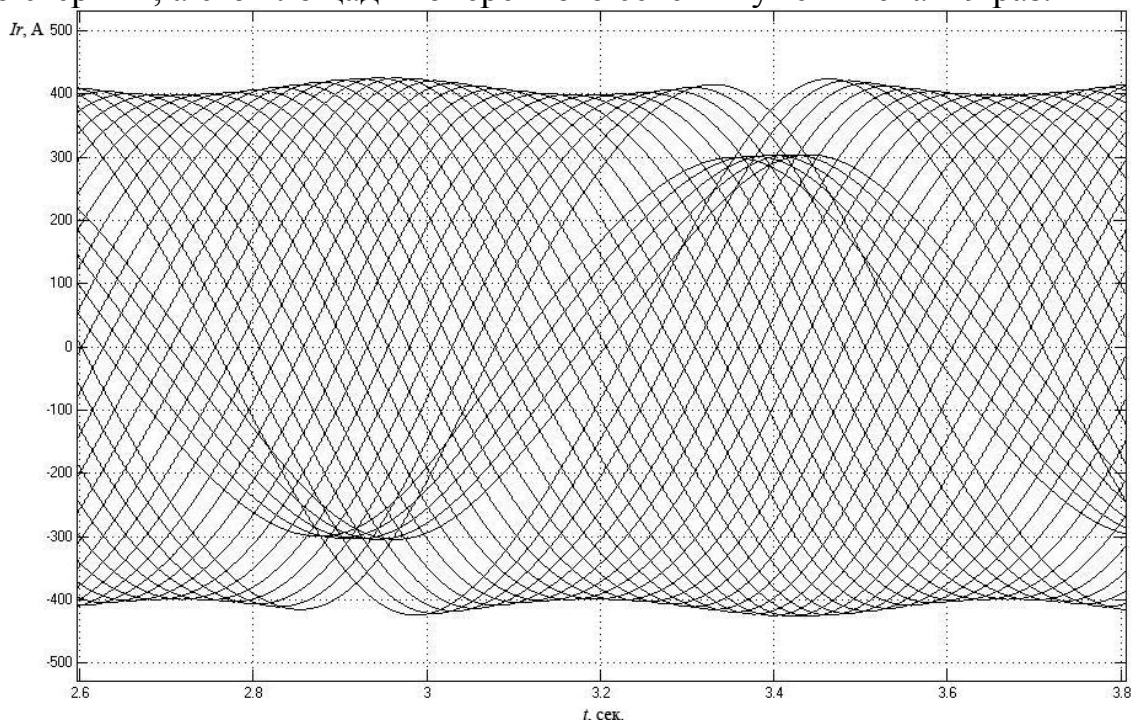


Рис. 1. Токи в роторе двигателя НВА-55 при 5-ти дефектных стержнях.

В таблице 1 приведены данные температур при моделировании режимов работы АВЭМ НВА-55 в условиях несимметричного и несинусоидального питания при наличии дефектов в роторе. При этом использовались реальные данные качества питающего напряжения, снятые при ходовых испытаниях электровоза 2ЭС5К «Ермак». При этом наибольшая величина несимметрии питания составляет 6,3%, а суммарный уровень высших временных гармоник до 26,5%.

Таблица 1. Температуры самых нагретых точек вспомогательного двигателя электровоза 2ЭС5К «Ермак»

Параметр	Варианты несимметричного электропитания				
	—		Реальные условия питания 2ЭС5К		
1	2	3	4	5	6
$U_h, \%$	0	26,5	4,5	26,5	7,5
$k_{12}, \%$	0	0	3	4	6,3
$k_{11}, \%$	100	100	120	100	96
Температуры при отсутствии дефектов стержней ротора					
$t_S, ^\circ\text{C}$	130	138	152	155	175
$t_R, ^\circ\text{C}$	130	138	131	150	167
Температуры при одном дефектном стержне ротора					
$t_S, ^\circ\text{C}$	210	222	243	247	278
$t_R, ^\circ\text{C}$	282	296	282	317	350
Температуры при двух дефектных стержнях ротора					
$t_S, ^\circ\text{C}$	302	320	350	352	396
$t_R, ^\circ\text{C}$	392	412	393	440	483
Температуры при трёх дефектных стержнях ротора					
$t_S, ^\circ\text{C}$	393	416	455	457	512
$t_R, ^\circ\text{C}$	507	532	506	568	623
Температуры при четырёх дефектных стержнях ротора					
$t_S, ^\circ\text{C}$	483	512	560	561	628
$t_R, ^\circ\text{C}$	600	628	600	670	734
Температуры при пяти дефектных стержнях ротора					
$t_S, ^\circ\text{C}$	565	600	655	656	—
$t_R, ^\circ\text{C}$	692	725	690	773	—

В таблице 1 использованы следующие обозначения.

U_h – суммарный уровень высших временных гармоник 3, 5, 7 и 9 порядков в питающем напряжении.

k_{12} – коэффициент несимметрии, определяемый как отношение напряжения обратной последовательности U_{12} к напряжению прямой последовательности U_{11} .

k_{11} – коэффициент напряжения прямой последовательности, определяемый как отношение U_{11} к номинальному фазному напряжению питания двигателя 220 В.

t_S – температура самой нагретой точки изоляции статора.

t_R – температура стержня ротора или дефектного участка при его наличии.

Условия работы АВЭМ НВА-55 на электровозе 2ЭС5К «Ермак» характеризуются низким качеством питающего напряжения, большим количеством отказов, многие из которых проявляются в выплавлении алюминиевого сплава обмотки ротора, что говорит о больших потерях в роторе при эксплуатации.

Проведённая работа в главе 2 позволяет сделать следующие выводы.

1. Разработана новая математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая комплексно учесть влияние несимметричного и несинусоидального питающего напряжения при наличии дефектов роторной клетки на работу машины.

2. Исследования показали, что предельные фактические значения несимметричных напряжений питания, высших временных гармоник напряжения и тока приводят к увеличению температуры нагрева обмоток статора и ротора, превышающей допустимое значение для класса изоляции F.

3. Принятая технология изготовления роторов НВА-55 допускает наличие дефектов в обмотки ротора. Исследования влияния дефектов в обмотке ротора с учётом низкого качества питающего напряжения показало сильное увеличение температур нагрева локальных участков роторных стержней и обмотки статора. Так при нескольких дефектных стержнях эти температуры достигают более 600°C .

4. Исследования по главе 2 позволили рекомендовать модернизацию конструкции асинхронного вспомогательного двигателя для снижения греющих электрических потерь при фактическом качестве напряжения.

В третьей главе проработаны вопросы поэтапной модернизации конструкции вспомогательной машины электровоза и схемы электрического питания АВЭМ. Разработана математическая модель группы асинхронных двигателей, питающихся от однофазной сети по конденсаторной схеме. Исследованы режимы работы АВЭМ при её одиночном пуске, а также при уже работающих параллельно соседних в группе машинах. Схема электрического питания АВЭМ приведена на рис. 2.

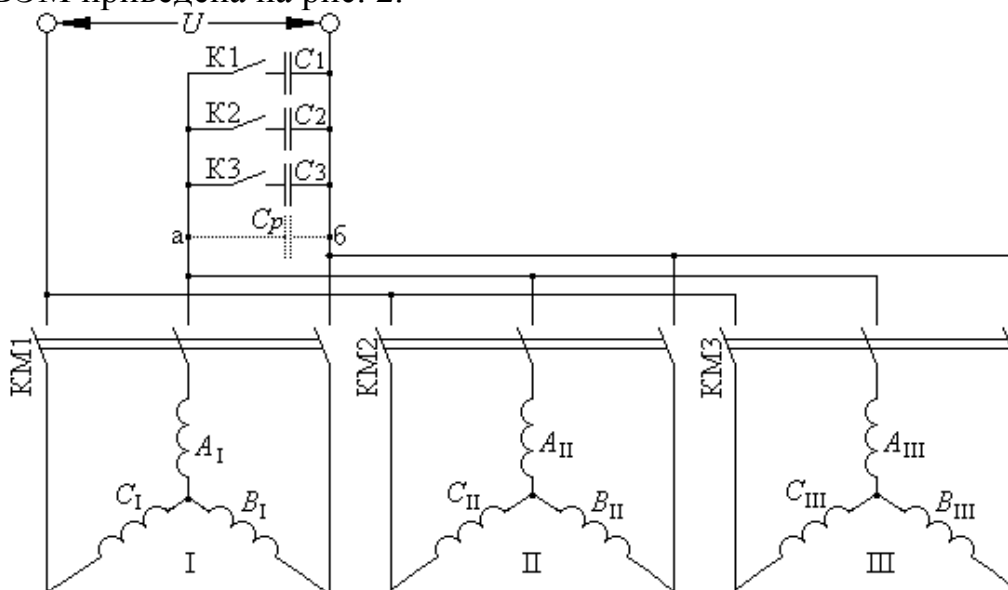


Рис. 2. Схема питания асинхронных двигателей при их совместной работе

Алгоритм работы схемы по рис. 2 заключается в следующем.

1. Пуск двигателя I включением КМ1, при этом к зажимам «а» и «б» подключаются все три конденсатора C_1 , C_2 и C_3 , образуя пусковую ёмкость.

2. Отключение ёмкостей C_2 и C_3 и перевод таким образом двигателя I в номинальный рабочий режим.

3. Пуск следующего двигателя II включением КМ2, при этом снова к зажимам «а» и «б» подключаются все конденсаторы.

4. Отключение ёмкости C_3 и перевод, таким образом, двигателя II в номинальный рабочий режим.

5. Пуск двигателя III включением контактора КМ3 и ёмкости C_3 .

Особенностью такой схемы питания является то, что каждый асинхронный двигатель является расщепителем фаз для соседних параллельно работающих машин.

Математическая модель асинхронных двигателей при групповом включении по схеме рис. 2 показана ниже.

С использованием метода симметричных составляющих, определяются токи и напряжения в фазах какого либо двигателя в группе:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{11} + \dot{I}_{12}; \quad (8)$$

$$\dot{I}_B = a \cdot \dot{I}_{11} + a^2 \cdot \dot{I}_{12}; \quad (9)$$

$$\dot{I}_C = a^2 \cdot \dot{I}_{11} + a \cdot \dot{I}_{12}; \quad (10)$$

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{11} + \dot{U}_{12} = \dot{I}_{11} \cdot \dot{Z}_{11} + \dot{I}_{12} \cdot \dot{Z}_{12}; \quad (11)$$

$$\dot{U}_B = a \cdot \dot{U}_{11} + a^2 \cdot \dot{U}_{12} = a \cdot \dot{I}_{11} \cdot \dot{Z}_{11} + a^2 \cdot \dot{I}_{12} \cdot \dot{Z}_{12}; \quad (12)$$

$$\dot{U}_C = a^2 \cdot \dot{U}_{11} + a \cdot \dot{U}_{12} = a^2 \cdot \dot{I}_{11} \cdot \dot{Z}_{11} + a \cdot \dot{I}_{12} \cdot \dot{Z}_{12}, \quad (13)$$

где $a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ – оператор поворота вектора на 120° ;

$\dot{U}_{11}$ и $\dot{U}_{12}$ – напряжения прямой и обратной последовательностей;

$\dot{Z}_{11}$ и $\dot{Z}_{12}$ – комплексные сопротивления статора прямой и обратной последовательностей;

$\dot{Z}_{21}$ и $\dot{Z}_{22}$ – комплексные сопротивления ротора прямой и обратной последовательностей.

Сопротивления $\dot{Z}_{11}$ и $\dot{Z}_{12}$, $\dot{Z}_{21}$ и $\dot{Z}_{22}$ находились по следующим соотношениям:

$$\dot{Z}_{21} = j \cdot v \cdot X'_2 \cdot Kx_{r_{\xi i \dot{a} \dot{n} 21v}} + \frac{R'_2 \cdot Kr_{21v}}{s_{1v}}; \quad (14)$$

$$\dot{Z}_{22} = j \cdot v \cdot X'_2 \cdot Kx_{r_{\xi i \dot{a} \dot{n} 22v}} + \frac{R'_2 \cdot Kr_{22v}}{s_{2v}}; \quad (15)$$

$$\dot{Z}_{11} = R_1 + j \cdot v \cdot X_1 \cdot Kxs_{i \dot{a} \dot{n} 11v} + [\dot{Z}_{0v}^{-1} + \dot{Z}_{21}^{-1}]^{-1}; \quad (16)$$

$$\dot{Z}_{12} = R_1 + j \cdot v \cdot Kxs_{i \dot{a} \dot{n} 12v} + [\dot{Z}_{0v}^{-1} + \dot{Z}_{22}^{-1}]^{-1}; \quad (17)$$

$$\dot{Z}_0 = j \cdot v \cdot X_m, \quad (18)$$

где v – номер гармоники;

s_{1v} и s_{2v} – скольжения для поля прямой и обратной последовательностей гармоники v , о.е.;

R_1 – активное сопротивление фазы статора, Ом;

R'_2 – активное приведённое сопротивление фазы ротора, Ом;

X_1 – индуктивное сопротивление фазы статора на частоте 50 Гц, Ом;

X'_2 – приведённое индуктивное сопротивление фазы ротора на частоте 50 Гц, Ом;

X_m – индуктивное сопротивление цепи намагничивания на частоте 50 Гц, Ом;

$\dot{Z}_{Cpv}$ – комплексное ёмкостное сопротивление конденсатора C_p гармоники v , Ом;

Kr_{21v} и Kr_{22v} – коэффициенты увеличения сопротивления ротора под влиянием эффекта вытеснения тока от полей прямой и обратной последовательностей гармоники v , о.е.;

$Kxr_{\xi_{нас21v}}$ и $Kxr_{\xi_{нас22v}}$ – коэффициенты уменьшения индуктивного сопротивления ротора под влиянием эффектов вытеснения тока и насыщения от полей прямой и обратной последовательностей гармоники v , о.е.

Были получены следующие выражения для определения токов прямой и обратной последовательности одного из двигателей:

$$\dot{I}_{11(I)} = \frac{U \cdot \gamma_2 \cdot (\dot{Z}_{12(I)} \cdot \dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{12(I)} \cdot \dot{Z}_{Cp} - a \cdot \dot{Z}_{12(I)} \cdot \dot{Z}_{11(II)}) \cdot (a - a^2) + U \cdot \Delta_2}{(\Delta_1 \cdot \dot{Z}_{12(I)} + \Delta_2 \cdot \dot{Z}_{11(I)}) \cdot (a - a^2)}; \quad (19)$$

$$\dot{I}_{12(I)} = \frac{U \cdot \gamma_2 \cdot (\dot{Z}_{11(I)} \cdot \dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{11(I)} \cdot \dot{Z}_{Cp} - a \cdot \dot{Z}_{11(I)} \cdot \dot{Z}_{11(II)}) \cdot (a - a^2) - U \cdot \Delta_1}{(\Delta_2 \cdot \dot{Z}_{11(I)} + \Delta_1 \cdot \dot{Z}_{12(I)}) \cdot (a - a^2)}, \quad (20)$$

где

$$\Delta_1 = \dot{Z}_{Cp} \dot{Z}_{11(II)} \gamma_2 + \gamma_1 (a - a^2) \left[\dot{Z}_{11(I)} \dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{Cp} \dot{Z}_{11(II)} - 2a (\dot{Z}_{11(I)} \dot{Z}_{11(II)}) - \dot{Z}_{11(I)} \dot{Z}_{Cp} + \right]; \quad (21)$$

$$\Delta_2 = \dot{Z}_{Cp} \cdot \dot{Z}_{11(II)} \cdot \gamma_2 + \gamma_1 \cdot (a - a^2) \cdot \left[\dot{Z}_{12(I)} \cdot (2 \cdot \dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{Cp}) - a^2 \cdot (\dot{Z}_{12(I)} \cdot \dot{Z}_{11(II)}) + \dot{Z}_{Cp}^2 + \right]; \quad (22)$$

$$\gamma_1 = \dot{Z}_{12(II)} \cdot \dot{Z}_{Cp} - 2 \cdot \dot{Z}_{11(II)} \cdot \dot{Z}_{12(II)} + a \cdot \dot{Z}_{11(II)} \cdot \dot{Z}_{12(II)} + \dot{Z}_{11(II)} \cdot \dot{Z}_{Cp} + a^2 \cdot (\dot{Z}_{11(II)} \cdot \dot{Z}_{12(II)}); \quad (23)$$

$$\gamma_2 = \dot{Z}_{Cp} \cdot (\dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{12(II)}) + a^2 \cdot \dot{Z}_{12(II)} - a \cdot \dot{Z}_{11(II)}. \quad (24)$$

Также вычислялись вращающие моменты, как разность моментов созданных полями прямой и обратной последовательностей соответствующей гармоники по следующим соотношениям:

$$M = m \sum_{v=1}^{\infty} \frac{I_{21}^2 \cdot R'_2 \cdot K_{r21v}}{\Omega_{\tilde{m}v} \cdot S_{1v}} - m \sum_{v=1}^{\infty} \frac{I_{22}^2 \cdot R'_2 \cdot K_{r22v}}{\Omega_{\tilde{m}v} \cdot S_{2v}}, \quad (25)$$

где m – число фаз (в данном случае 3);

Ω_{cv} – синхронная частота вращения гармоники v .

Для оценки адекватности данной математической модели проведён практический эксперимент с одним и двумя экземплярами двигателей АД80. Пуск двигателя производился по схеме рис. 2 как одиночный, так и при одновременно работающей в установившемся режиме второй машине. На рис.

3 показана диаграмма экспериментально снятых данных линейных напряжений и фазных токов.

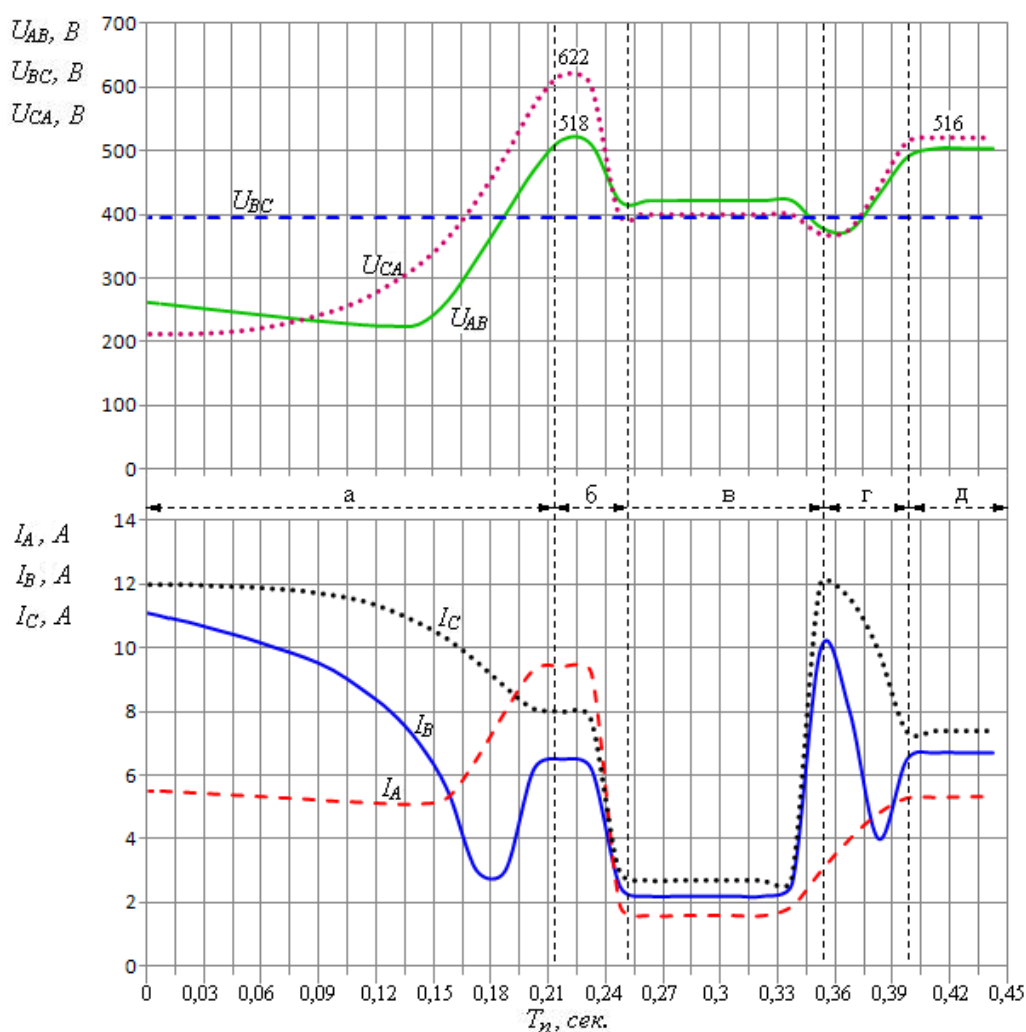


Рис. 3. Диаграмма экспериментальных данных

На диаграмме рис. 3 обозначены следующие интервалы:

а – одиночный пуск двигателя при пусковой ёмкости 75 мкФ;

б – промежуток времени, когда двигатель после пуска ещё работает при пусковой ёмкости 75 мкФ и производится переключение конденсаторных батарей на рабочую ёмкость 15 мкФ;

в – работа двигателя при рабочей ёмкости 15 мкФ;

г – пуск второго двигателя при одновременно работающей в установившемся режиме предыдущей машине. Ёмкость конденсаторных батарей при этом составляет 75 мкФ;

д – промежуток времени, когда двигатель после пуска ещё работает при пусковой ёмкости 75 мкФ и далее отключается питание всех машин.

Для сравнения результатов опыта и моделирования произведён расчёт напряжений и токов двигателя в процессе пуска. Моделирование этих режимов осуществлялось при тех же заданных условиях, что и в практическом эксперименте. Погрешность между опытными и расчётными данными в отдельных точках не превышает 7 %.

На рис. 4-6 показаны диаграммы электрических перенапряжений при пуске НВА-55, полученные с помощью математической модели группового включения асинхронных двигателей (8-25) при однофазном питании по конденсаторной схеме (рис. 2).

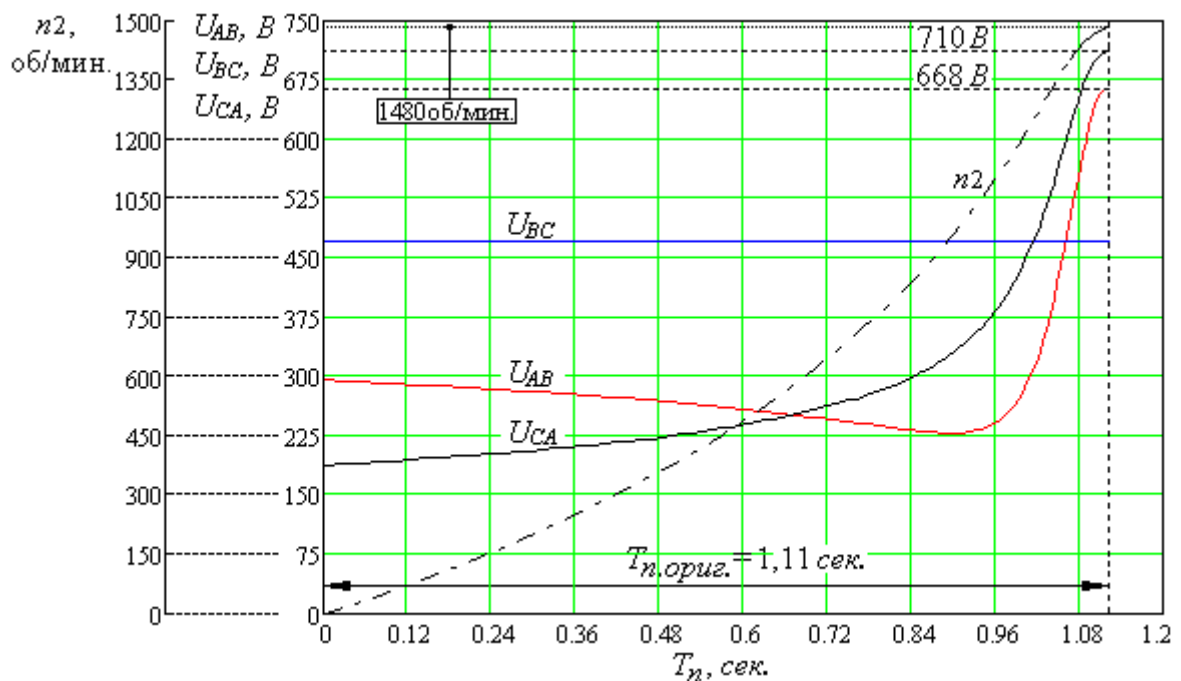


Рис. 4. Диаграмма линейных напряжений двигателя при его одиночном пуске от однофазного питания 470 В и пусковой ёмкости 2178 мкФ

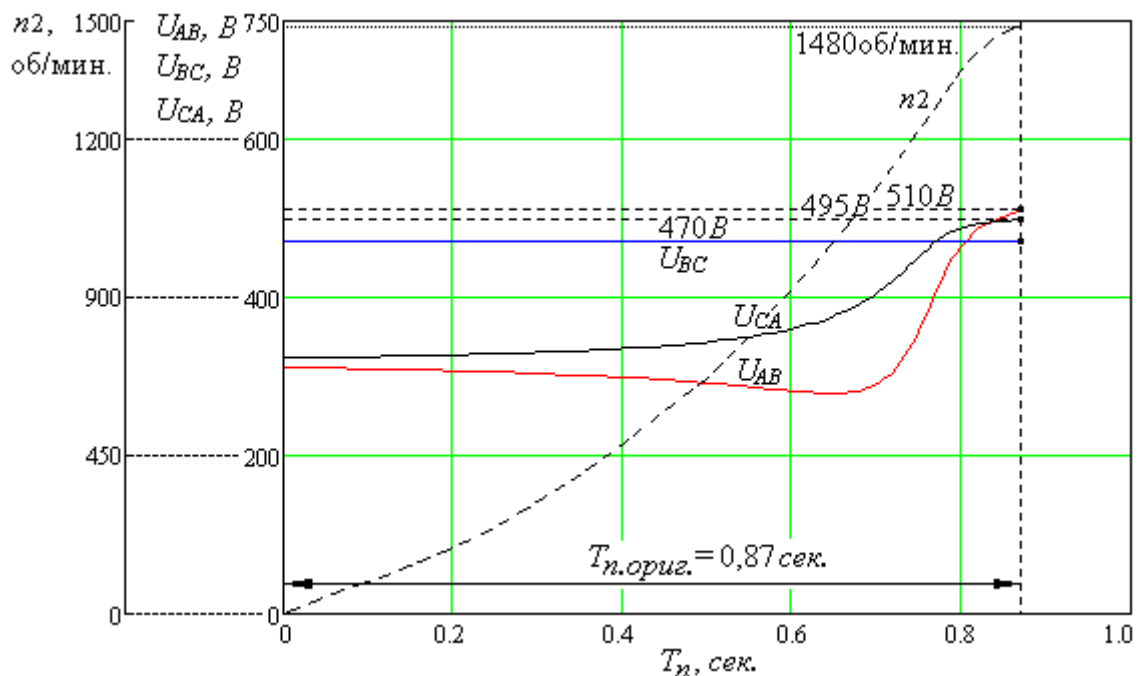


Рис. 5. Диаграмма линейных напряжений двигателя при его пуске от однофазного питания 470 В и пусковой ёмкости 2178 мкФ одновременно с работающей в длительном режиме соседней асинхронной машиной

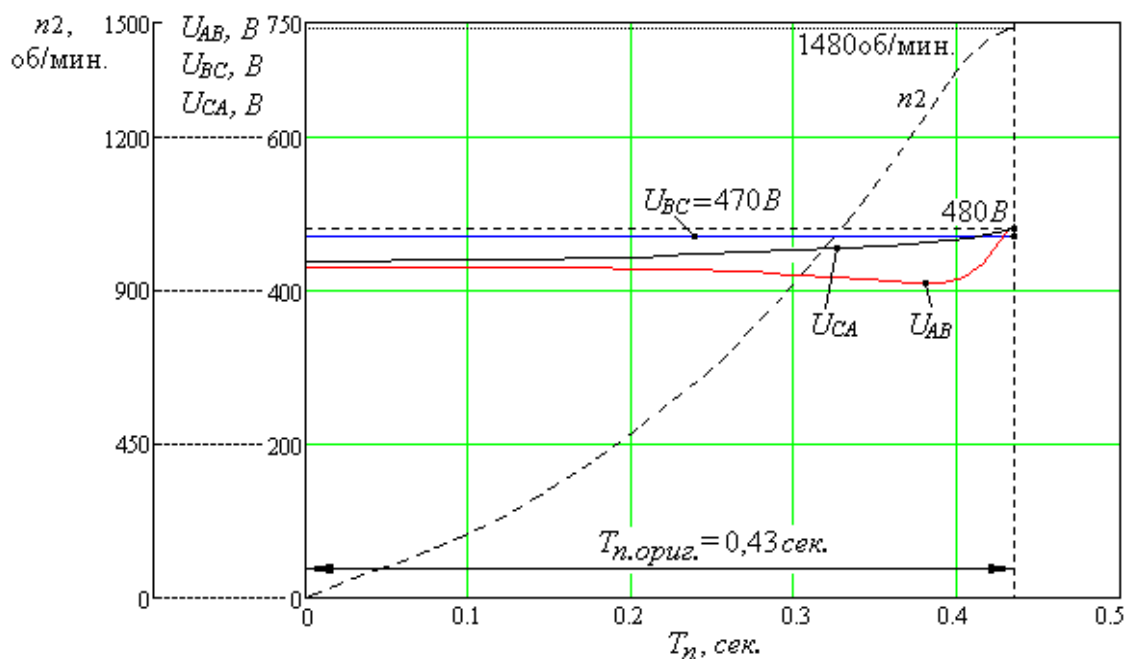


Рис. 6. Диаграмма линейных напряжений двигателя при его пуске от однофазного питания 470 В и пусковой ёмкости 2178 мкФ одновременно с работающими в длительном режиме двумя асинхронными машинами

По рис. 4 видно, что одиночный пуск двигателя сопровождается сильными бросками линейных напряжений, которые могут достигать 710В, что выше допустимого напряжения 660В для используемой изоляции статора, и может являться причиной её ускоренного старения. При пуске двигателя одновременно с работающей в длительном режиме соседней асинхронной машиной, броски напряжений ниже, чем при одиночном пуске, и составляют до 510 В (рис. 5). При пуске одновременно с двумя работающими в установившемся режиме двигателями (рис. 6), перенапряжения не превышают 480 В.

На этапах модернизации конструкции НВА-55 проработано четыре варианта двигателя с различной степенью уменьшения активного сопротивления ротора с целью снижения греющих электрических потерь для уменьшения тепловых нагрузок на машину (таблица 2). При этом материал клетки ротора заменён с алюминиевого сплава на медь, предусмотрены аксиальные вентиляционные каналы в роторе. Изоляция статора применена на номинальное напряжение 3300В для увеличения её стойкости к электрическим перенапряжениям при пуске. При удлинении активной части более чем на 15%, изменена конструкция подшипниковых щитов двигателя и установлен дополнительный осевой вентилятор для улучшения условий охлаждения. Кроме того, в схеме питания группы АВЭМ по рис. 2 введена дополнительная пусковая ёмкость для обеспечения необходимого пускового момента 130Н·м при линейном напряжении питания 280В в связи со снижением активного сопротивления роторной клетки НВА-55.

Таблица 2

Режим	Температуры самых нагретых точек статора и ротора для разных вариантов двигателя НВА-55, °С				
	Оригинал	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Материал клетки ротора	Алюминий	Медь	Медь	Медь	Медь
Симметричное питание	130	107	101	96	92
Несимметричное питание 6,3% с временными гармониками до 12%	175	143	136	139	122
Один стержень ротора с участком уменьшенного сечения	278	225	217	202	195
Среднее уменьшение температуры самых нагретых точек, %					
—	—	18	22	26	30
Уменьшение активного сопротивления ротора, %					
—	—	43	53	58	62
Изменение геометрических размеров, %					
Увеличение глубины паза ротора	—	90	120	150	175
Удлинение активной части	—	15	20	23	25
Увеличение внутреннего диаметра статора	—	0	2	5	8
Энергетические показатели					
КПД, %	90,2	91,7	92,0	92,5	93,0
cosφ, о.е.	0,820	0,798	0,788	0,780	0,771

Выше приведённые решения по изменению конструкции вспомогательного двигателя и схемы его питания позволяют в комплексе повысить устойчивость данной асинхронной машины к работе в условиях несинусоидального и несимметричного питающего напряжения, а также ликвидировать проблемы, связанные с расплавлением клетки ротора в ходе эксплуатации двигателя.

Кроме того, выполнено экономическое обоснование модернизации двигателя НВА-55. При этом рассматривалось три варианта.

1. Существующее состояние, которое характеризуется большим количеством отказов, подтверждённых статистикой локомотивных депо.

2. Обеспечение симметрии питающего напряжения применением для каждого двигателя преобразователя частоты, который одновременно обеспечивает плавный пуск и регулирование частоты вращения.

3. Модернизация конструкции двигателя под неизменные условия питания и управления на электровозе.

При этом была обоснована целесообразность модернизации конструкции двигателя под неизменные условия питания и управления на электровозе как наиболее выгодного решения.

В четвёртой главе проработаны вопросы по защите асинхронных вспомогательных машин от тепловых перегрузок, вызванных несимметрией и наличием высших временных гармоник питания, а также наличием дефектов стержней ротора. Разработана система мониторинга теплового состояния асинхронных машин. В работу данной системы заложен принцип «суперпозиции», при котором по отдельности учитывается влияние несимметричного и несинусоидального напряжения, а также дефектов стержней ротора на работу асинхронного двигателя. Структурная схема системы мониторинга приведена на рис. 7.

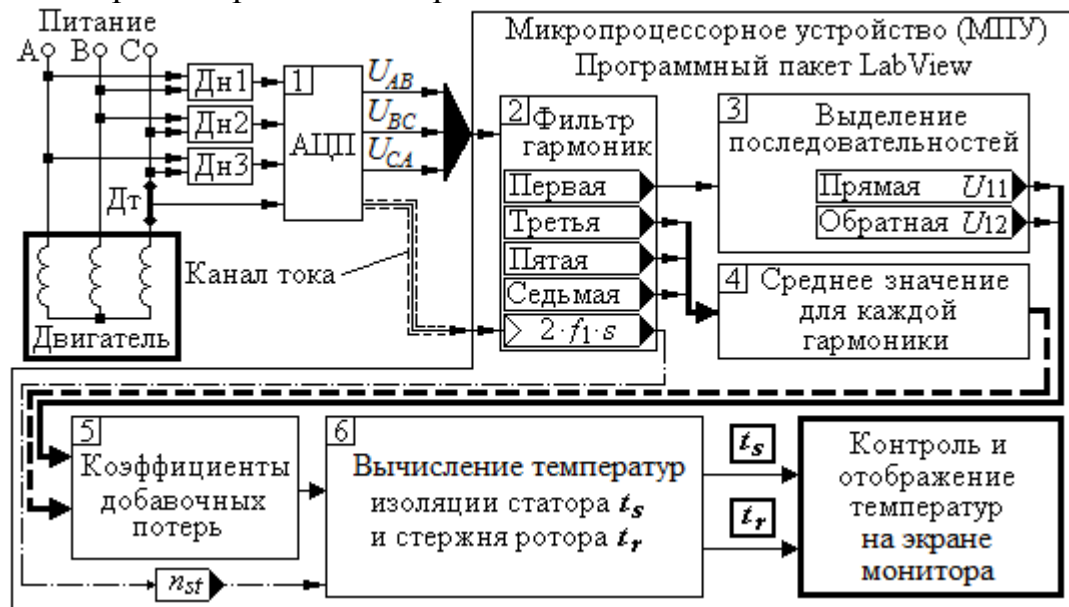


Рис. 7. Система мониторинга теплового состояния асинхронных машин
Принцип работы системы заключается в следующем.

1. С помощью датчиков тока и напряжения снимаются с зажимов двигателя потребляемый фазный ток и линейные напряжения.

2. Данные напряжений и тока преобразуются в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя.

3. Вычисляются коэффициенты несимметрии, гармонической составляющей и величина колебаний фазного тока частотой $f_1(1 \pm s)$, где f_1 – частота питающей сети, s – скольжение.

4. Вычисленные коэффициенты обрабатываются передаточными функциями для расчёта выделяемых в двигателе добавочных греющих потерь под влиянием таких факторов, как: несимметрия и несинусоидальность напряжения питания, наличие дефектов в роторе. Данные передаточные функции представляют собой зависимости добавочных электрических и магнитных потерь от таких величин, как несимметрия питания, уровень высших временных гармоник питания, количество дефектных стержней. Эти передаточные функции предварительно получены с помощью математической модели асинхронного двигателя, построенной через мгновенные величины токов, напряжений и потокосцеплений (1-7) на основании рассчитанных токах при различной несимметрии и несинусоидальности питания, а также при несимметрии сопротивления роторной клетки.

5. На основании вычисленных добавочных греющих потерь определяются температуры самых нагретых точек двигателя. Для вычисления используются передаточные функции, представляющие собой зависимость изменения добавочной температуры от изменения добавочных греющих потерь. Эти функции предварительно получены с помощью программного продукта Elcut, позволяющей рассчитать температурное поле в двигателе при заданном тепловыделении в различных участках машины. Для учёта дефектов роторной клетки, используется передаточная функция n_{st} которая позволяет определить число дефектных стержней по уровню тока статора частотой $f_1(1\pm s)$ для последующей корректировки температур, вычисляемых в блоке 6.

Передаточные функции расчёта добавочных потерь и температур, могут быть предварительно рассчитаны для ряда машин и храниться в памяти МПУ.

Для оценки адекватности системы мониторинга проведён сравнительный анализ результатов практического эксперимента, проведённого на предприятии «ВЭЛНИИ» по измерению температур двигателя при несимметричном питании, и результатов расчёта этих температур с помощью данной системы (таблица 3).

Таблица 3

Питание напряжением прямой и обратной последовательностей соответственно U_{11} и U_{12} , при мощности на валу P_2	$U_{11}=255$ В $U_{12}=25$ В $P_2=39$ кВт	$U_{11}=490$ В $U_{12}=25$ В $P_2=50$ кВт
Температура обмотки статора опытная, °С	124	151
Температура обмотки статора расчётная, °С	130	158

По результатам из таблицы 3 видно, что погрешность между опытными и расчётными данными составляет до 5 %. Разработанная система мониторинга позволяет своевременно предотвратить потенциально возможные аварийные ситуации на тяговом подвижном составе.

В заключении приведены основные выводы по проделанной работе.

В приложениях представлены акты внедрения результатов работы и расчётные данные по соответствующим разделам диссертационной работы, иллюстративные материалы результатов моделирования и расчётов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Исследования подвижного состава показали высокую степень аварийности эксплуатируемых вспомогательных асинхронных двигателей электропоездов. Число заходов электропоездов на внеплановый ремонт по вине вспомогательных электрических машин ежегодно увеличивается на 15-20 %. У вышедших из строя двигателей наблюдаются следы расплавления короткозамкнутой клетки роторов и следы выгорания изоляции обмотки статора. Всё это вызывает убытки и требует исследования причин, приводящих к выходу из строя асинхронных вспомогательных двигателей, и разработки мер по снижению отказов.

2. Проведённые исследования качества напряжения контактной сети и напряжения АВЭМ на борту локомотива 2ЭС5К показали, что по несинусоидальности, несимметрии и диапазону колебания напряжений и токов нормированные ГОСТом показатели не соблюдаются. Анализ технологии

производства асинхронного вспомогательного двигателя НВА-55 также позволил предположить несовершенство изготовления литых обмоток ротора.

3. Созданная математическая модель асинхронной машины с многофазным ротором позволила оценить влияние несимметричного и несинусоидального питания на потери и температуры статора и ротора вспомогательного двигателя. Также одновременно оценивалось влияние дефектов стержней обмотки ротора. Эти исследования показали, что при определённых сочетаниях всех факторов возникают потери, вызывающие локальный нагрев ротора, часто приводящий к выплавлению алюминия. Это является причиной возникновения аварийной ситуации.

4. Исследования схемы питания асинхронных вспомогательных двигателей на электровозе 2ЭС5К с помощью созданной математической модели группового включения трёхфазных двигателей в однофазную сеть с конденсатором показали, что резонансные явления при пуске двигателей в группе проявляются слабо. Однако, при пуске одного двигателя имеют место электрические перенапряжения до 710 В. Это особенно опасно при предельно высоком линейном напряжении питания 470 В и может быть одной из причин ускоренного старения пазовой и витковой изоляции статорной обмотки.

5. Проведённые исследования позволили установить причины отказов НВА-55 и рекомендовать модернизацию двигателя изменением активной части и системы вентиляции с сохранением габаритных размеров, что позволило при тех же условиях эксплуатации снизить температуры нагрева статора и ротора на 30% без ухудшения энергетических показателей машины. При этом рассмотрен ряд вариантов двигателя с различной степенью удлинения активной части, необходимой для обеспечения её оптимальной электромагнитной загрузки в диапазоне линейного напряжения питания 280-470 В при различной глубине пазов ротора. Увеличение глубины пазов ротора вызвано необходимостью снижения активного сопротивления ротора с целью уменьшения в нём греющих потерь, а также необходимостью обеспечения достаточного пускового момента машины не менее 130 Нм за счёт усиления поверхностного эффекта. Рассмотрены варианты замены материала клетки ротора с алюминиевого сплава на медь с целью снижения его удельного сопротивления.

6. Экономическое обоснование модернизации конструкции асинхронного вспомогательного двигателя показало, что стоимость двигателя возрастает незначительно, за счёт снижения отказов, затраты на модернизацию окупятся в течение одного года.

7. Результаты исследования качества питающего напряжения с учётом дефектов литой обмотки ротора обеспечили создание системы мониторинга теплового состояния вспомогательных машин. Она позволяет своевременно контролировать нагрев статора и ротора и предупреждать аварийные ситуации с асинхронными вспомогательными электрическими машинами на тяговом подвижном составе при эксплуатации.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гирник А.С., Рапопорт О.Л. Работа трёхфазных вспомогательных электрических машин на электровозе в условиях асимметричного питания // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. №4. – С. 69-73.

2. Гирник А.С., Рапопорт О.Л. Система мониторинга асинхронных двигателей в условиях несимметричного питания // Известия вузов. Электромеханика. – №6. – 2009. – С. 27-31.

3. Гирник А.С., Рапопорт О.Л. Исследование пусковых режимов работы вспомогательных асинхронных двигателей электровозов «Ермак» // Электричество, – №6. – 2011. – С. 41-46.

Другие научные публикации по теме диссертации:

4. Гирник А.С. Влияние качества питающего напряжения на режим работы вспомогательного асинхронного двигателя электровоза // Труды XIV международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии». Томск. – 2008. – С. 308-310.

5. Гирник А.С. Мониторинг вспомогательных асинхронных двигателей электровозов // Труды XV международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии». Томск. – 2009. – С. 389-390.

6. Гирник А.С. Повышение надёжности вспомогательных асинхронных двигателей электровозов // Труды XV международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии». Томск. – 2009. – С. 391-392.

7. Гирник А.С. Исследование погрешности математического моделирования асинхронного двигателя в условиях несимметричного питания // Материалы VI международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии». Томск. – 2009. – С. 160-164.

Свидетельство:

8. Гирник А.С. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2009612867, 2009 г. Программа расчёта переходных процессов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Личный вклад автора

Автор единолично написал 4 работы [4, 5, 6, 7] и разработал программу для ЭВМ [8]. В работах, написанных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: [1] разработка математической модели асинхронного двигателя для исследования его работы при несимметричном и несинусоидальном питании с наличием дефектов роторной клетки; [2] разработка системы теплового мониторинга асинхронных двигателей; [3] разработка математической модели группы асинхронных двигателей при общем однофазном питании.