

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB/Simulink

И.Ф. Суворов¹, В.В. Романова², С.В. Хромов²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,

² Забайкальский государственный университет, г. Чита

На основании аналитических расчетов, а также имитационного моделирования с использованием программного комплекса MATLAB и пакета Simulink, рассмотрены вопросы исследования режимов работы асинхронных двигателей различной мощности с короткозамкнутым ротором серии 4А.

Основной целью данного исследования является анализ влияния несимметрии фазных напряжений, связанной отклонениями фазных напряжений, на режимы работы АД. Величина отклонения напряжений изменялась с шагом в 5 %, предельное значение отклонения напряжений составляло 10 % от номинального.

Проведены исследования статических и динамических механических характеристик двигателей, зависимостей фазных токов электродвигателей от величины отклонения напряжений, показывающих качественное и количественное влияние отклонения напряжений в одной или более фазах, возникающих при одновременном подключении трехфазной и значительной однофазной нагрузок.

Полученные результаты имитационного моделирования позволят разработать методы и технические средства, оперативно реагирующие на изменения величины отклонения питающего напряжения в местах действия значительных нелинейных, несимметричных нагрузок.

Ключевые слова: имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink, асинхронный двигатель, режимы работы асинхронного двигателя, отклонение напряжения, несимметрия напряжений.

Введение

В настоящее время трехфазные асинхронные двигатели переменного тока (АД) получили преимущественное распространение во всех сферах производственной деятельности в качестве самых надёжных электрических машин благодаря, прежде всего, простоте конструкции, высокой надежности и производительности.

При исследовании работы АД весьма актуальной является задача оценки влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы двигателей. Так, согласно [1] из-за нарушения изоляции прекращают свою работу около 75 % электродвигателей, а экономический ущерб от выхода из строя одного двигателя достигает 20 тыс. руб. и более.

Нарушение изоляции может возникнуть в результате ненормальных режимов питающей сети, например отклонения напряжений в фазах и несимметрия фазных напряжений, вызванных, прежде всего, большим количеством однофазных нагрузок, таких как современные источники света, компьютерная техника, железнодорожная электрическая тяга [2, 3] и другие силовые приборы, содержащие нелинейные преобразователи. Очевидно, что все это приводит двигатель к преждевременному выходу из строя или сокращению его срока службы, кроме того нарушению и возмож-

ной остановке технологического процесса [4, 5], в котором участвует двигатель. Для предотвращения и своевременного прогнозирования данных ситуаций необходимо всестороннее исследование режимов работы асинхронных двигателей. Поэтому моделирование указанных режимов и исследование статических и динамических характеристик АД представляет важную научно-техническую задачу. Примером подобных исследований являются работы [6, 7]. Отличием от приведенных исследований является то, что в данной работе рассматривается непосредственно изменение тока в фазах электродвигателя, а не дополнительный нагрев и потери в исследуемых двигателях.

1. Построение имитационной модели

Эффективным способом исследования режимов работы электрических машин является компьютерное моделирование.

Анализ современных программных средств показал преимущество программного пакета MATLAB перед подобными аналогами. Данный продукт содержит модуль Simulink, который позволяет выполнять симуляцию работы моделируемых достаточно сложных технических систем и устройств, т. е. осуществлять имитационное моделирование. Кроме того, с помощью пакета Simulink появляется воз-

возможность реализации ряда задач – от решения простейших математических задач до моделирования сложных программно-технических комплексов.

Основной задачей работы является исследование статических и динамических характеристик в различных режимах работы АД с короткозамкнутым ротором на виртуальной модели, реализованной в наглядном и эффективном средстве имитационного моделирования Simulink интерактивной среды программирования MATLAB, с целью выявления влияния отклонения фазных напряжений на одной, двух или трех фазах АД.

Для исследования режимов работы АД предлагается рассмотреть схему, состоящую из трех однофазных источников электрической энергии, асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, блоков для измерения основных параметров двигателя, осциллографов для измерения тока, напряжения, момента и скорости.

В качестве объекта исследования выбраны асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором малой и большой мощности одной серии: АД марки 4A112M4Y3 с $P_n = 5,5$ кВт и АД марки 4A315S4Y3 с $P_n = 160$ кВт.

По причине того, что двигатели с $P_n < 100$ кВт и $P_n > 100$ кВт имеют различную конструкцию ротора [8–10], возникла необходимость исследования подобных двигателей с целью выявления отклонения от нормальных режимов работы.

Номинальные параметры асинхронных двигателей приведены в табл. 1.

Компьютерное моделирование прямого пуска АД проведено при питании трёхфазным напряжением 380 В с частотой 50 Гц.

При расчете параметров схемы замещения асинхронного двигателя значения параметров асинхронного двигателя частично берутся из паспортных данных двигателя, а частично рассчитываются на основании этих данных.

На практике, как правило, наиболее часто применима Г-образная схема замещения асинхронного двигателя, в ряде случаев она дает более точные результаты, чем Г-образная схема замещения [11, 12].

По известным паспортным данным АД и параметрам Г-образной схемы замещения (рис. 1), представленным в табл. 1 рассчитываются параметры Т-образной схемы замещения (рис. 2) в режиме

Таблица 1

Параметры асинхронных двигателей

Мощность двигателя, P , кВт	Марка двигателя	Номинальная частота вращения, n , об/мин	η	$\cos\phi$	Кратность пускового момента, $K_{мп}$	Кратность пускового тока, $K_{п}$
5,5	4A112M4Y3	1500	0,855	0,85	2	7
160	4A315S4Y3	1500	0,935	0,93	1,9	7

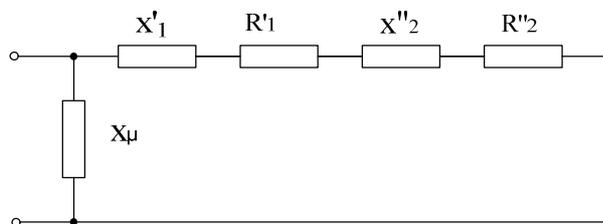


Рис. 1. Г-образная схема замещения асинхронной машины: x_{μ} – взаимное индуктивное сопротивление обмоток статора и ротора; x'_1 – индуктивное сопротивление обмоток статора; x''_2 – индуктивное сопротивление обмоток ротора, приведенное к обмотке статора; R'_1 – активное сопротивление рассеяния обмоток статора; R''_2 – активное сопротивление рассеяния обмоток ротора, приведенное к обмотке статора

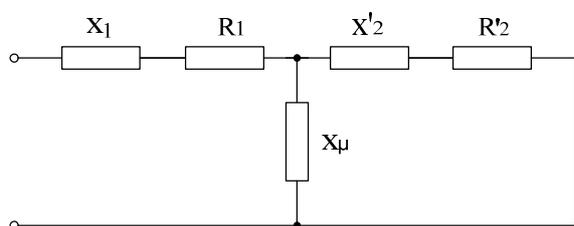


Рис. 2. Т-образная схема замещения асинхронной машины: x_{μ} – взаимное индуктивное сопротивление обмоток статора и ротора; x_1 – реактивное сопротивление рассеяния обмоток статора; x'_2 – реактивное сопротивление рассеяния обмоток ротора; R_1 – активное сопротивление обмоток статора; R'_2 – активное сопротивление обмоток ротора

Таблица 2

Результаты расчета параметров схемы замещения АД

Типоразмер электродвигателя	P , кВт	Параметры схемы замещения						
		В номинальном режиме					При коротком замыкании	
		R'_1	x'_1	R''_2	x''_2	x_{μ}	$R''_{2кз}$	$X''_{2кз}$
4A112M4Y3	5,5	0,064	0,078	0,041	0,13	2,8	0,048	0,062
4A315S4Y3	160	0,018	0,107	0,017	0,15	4,6	0,045	0,083

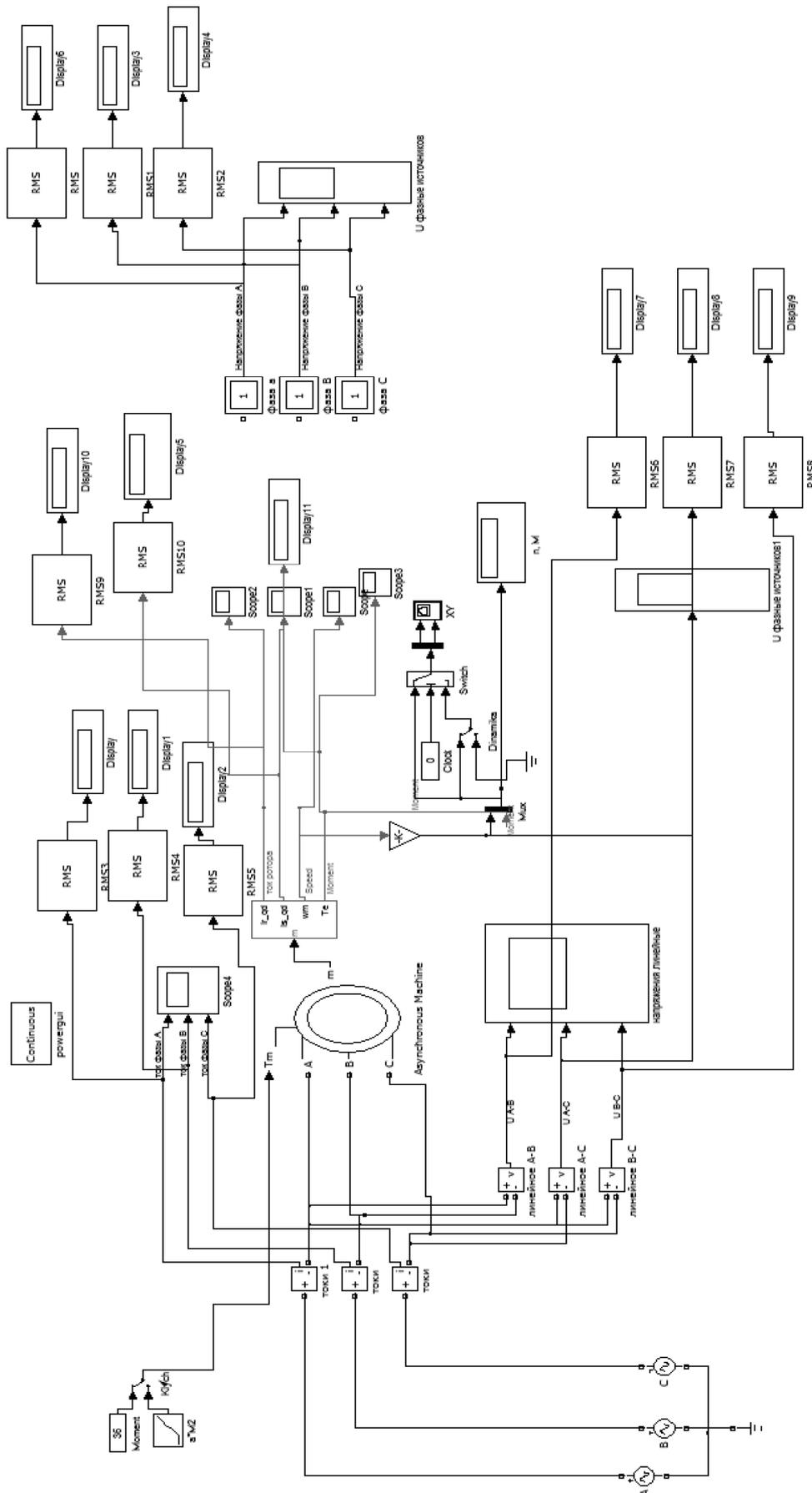


Рис. 3. Схема моделирования, реализованная в среде MATLAB/Simulink

короткого замыкания и входные параметры компьютерной модели двигателя.

Для расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя используем алгоритмы, приведенные в источниках [13–18]. Результаты расчета сведены в табл. 2.

При моделировании АД использовалась стандартная модель из библиотеки Simulink с представлением всех величин в относительных единицах.

Используя готовые блоки из библиотеки пакета Simulink, осуществляем подбор необходимых блоков модели, представляя их в виде структурной схемы. После установки блоков необходимо выполнить соединение элементов схемы, после чего формируем функциональные связи элементов, обобщаем в единую модель.

Схема моделирования для исследования режимов работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, сформированная средствами имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink, представлена на (рис. 3).

В основу данной модели для исследования режимов работы асинхронного двигателя заложены следующие основные элементы:

1) источник напряжения – трехфазное напряжение задано тремя стандартными однофазными источниками – блоком AC Voltage Source. Базовыми параметрами источника напряжения являются: амплитуда (В), частота (Гц), начальная фаза (градусы);

2) асинхронный двигатель – задан блоком Asynchronous Machine. Асинхронный двигатель, в данной схеме модели, является самым сложным элементом с учетом влияния электромеханических процессов. Блок Asynchronous Machine моделирует асинхронную электрическую машину, составлен на основе Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя (рис. 4).

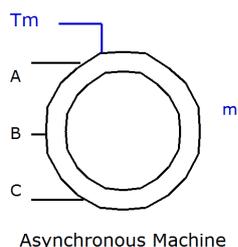


Рис. 4. Внешний вид блока Asynchronous Machine

3) измеритель тока – задан блоком Current Measurement;

4) измеритель напряжения – задан блоком Voltage Measurement.

Кроме этого модель содержит такие блоки, как:

1) блок Display – для количественного представления измеренных величин;

2) блок Scope – для наблюдения токов ротора и статора, а также скорости и момента асинхронного двигателя;

3) блок Moment – для задания механического момента на валу асинхронного двигателя;

4) блок RMS – для перевода амплитудных величин в действующие;

5) блок XY Graph (графопостроитель) – для отображения электромеханической характеристики двигателя.

В полученной виртуальной модели имеется возможность исследования переходных процессов в асинхронном двигателе, снятия рабочих и искусственных механических характеристик, напряжения, токов и частоты питающей сети [18].

С использованием разработанной модели были исследованы следующие режимы работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

1) нагрузка на валу двигателя изменялась от 0 до 100 % (0, 50, 100 %);

2) напряжения на двух фазах изменялись ± 10 и ± 5 % от номинального, при постоянном номинальном напряжении на третьей фазе;

3) режим 100 % загрузки двигателя (при питающих фазных напряжениях ± 10 и ± 5 % от номинального по всем трем фазам) [19–23];

4) абсолютно номинальный режим питающей сети, т. е. при напряжении на каждой фазе 220 В и, соответственно, линейном напряжении 380 В без искажений синусоиды.

2. Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены в нижеприведенных табл. 3–6 и рис. 5–13.

1. Изменение величины нагрузки на валу двигателя при симметричном питающем напряжении.

Результаты, полученные при моделировании, подтвердили прямую зависимость тока двигателя от загрузки на валу, а также достаточную точность

Таблица 3

Результаты моделирования АД 4A112M4Y3 с $P_n = 5,5$ кВт

Линейные напряжения, В			Фазные напряжения, В			Фазные токи, А		
U_{AB}	U_{AC}	U_{BC}	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C
Холостой ход								
380	380	380	220	220	220	6,022	6,002	6,004
50 % нагрузка								
380	380	380	220	220	220	7,464	7,466	7,432
100 % нагрузка								
380	380	380	220	220	220	10,8	10,8	10,8

Таблица 4

Результаты моделирования АД 4А315S4У3 с $P_n = 160$ кВт

Линейные напряжения, В			Фазные напряжения, В			Фазные токи, А		
U_{AB}	U_{AC}	U_{BC}	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C
Холостой ход								
380	380	380	220	220	220	116,5	116,5	116,5
50 % нагрузка								
380	380	380	220	220	220	173,9	173,9	173,9
100 % нагрузка								
380	380	380	220	220	220	289	289	289

Таблица 5

Результаты моделирования АД 4А112М4У3 с $P_n = 5,5$ кВт

Отклонения от $U_{ном}$ по фазам, %			Токи в фазах электродвигателя, А			Отклонения токов электродвигателя от $I_{ном}$, %		
Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
-10	-10	-10	11,71	11,71	11,71	106,84	106,84	106,84
-5	-5	-5	11,17	11,13	11,17	101,92	101,55	101,92
0	0	0	10,96	10,96	10,96	100,00	100,00	100,00
5	5	5	10,50	10,46	10,48	95,80	95,44	95,62
10	10	10	10,46	10,46	10,46	95,44	95,44	95,44
10	5	10	11,52	8,84	11,39	105,11	80,61	103,92
5	5	10	9,67	9,65	12,06	88,18	88,07	110,04
5	0	5	11,49	8,92	11,55	104,84	81,36	105,38
0	0	5	9,84	9,98	12,31	89,78	91,06	112,32
0	0	-5	12,05	11,87	9,37	109,95	108,30	85,49
-5	0	-5	10,45	12,69	10,16	95,35	115,78	92,70
-10	-5	-5	9,70	12,41	12,05	88,47	113,23	109,95
-10	-5	-10	11,09	13,26	10,70	101,19	120,99	97,63
10	0	10	12,68	7,32	12,57	115,69	66,78	114,69
-10	0	-10	10,61	14,76	9,88	96,81	134,67	90,16

Таблица 6

Результаты моделирования АД 4А315S4У3 с $P_n = 160$ кВт

Отклонения от $U_{ном}$ по фазам, %			Токи в фазах электродвигателя, А			Отклонения токов электродвигателя от $I_{ном}$, %		
Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
-10	-10	-10	311,4	311,4	311,4	107,75	107,75	107,75
-5	-5	-5	297,4	297,4	297,4	102,91	102,91	102,91
0	0	0	289,0	289,0	289,0	100,00	100,00	100,00
5	5	5	278,7	278,7	278,7	96,44	96,44	96,44
10	10	10	270,4	268,1	268,1	93,56	92,77	92,77
10	5	10	290,0	226,5	299,6	100,35	78,37	103,67
5	5	10	251,5	262,9	319,2	87,02	90,97	110,45
5	0	5	297,3	235,8	309,3	102,87	81,59	107,02
0	0	5	256,2	271,2	325,5	88,65	93,84	112,63
0	0	-5	323,6	308,4	250,4	111,97	106,71	86,64
-5	0	-5	286,6	338,3	269,3	99,17	117,06	93,18
-10	-5	-5	263,5	335,7	320,2	91,18	116,16	110,80
-10	-5	-10	300,9	351,7	281,9	104,12	121,70	97,54
10	0	10	316,8	187,5	336,5	109,62	64,88	116,44
-10	0	-10	291,6	387,8	251,1	100,90	134,19	86,89

модели при полной нагрузке, т. е. ток, полученный при моделировании равен току при аналитическом расчёте.

2. Изменение диапазона питающего напряжения.

Для анализа полученных результатов исследования построены графики зависимостей фазных токов от k_{2U} и отклонения напряжений. Графики зависимостей и их обсуждение приведены в разделе 4.

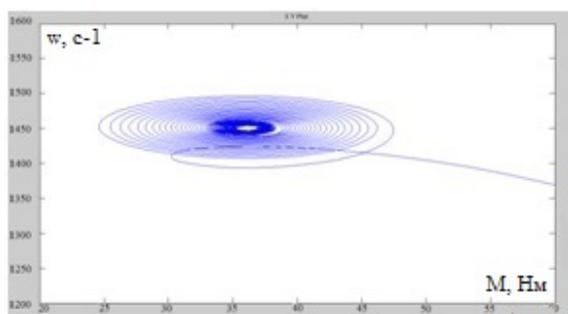
3. Сравнительный анализ динамических механических характеристик асинхронных двигателей

Далее рассмотрим сравнение ряда динамических механических характеристик асинхронных

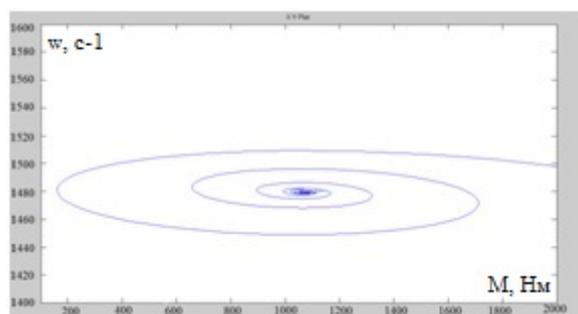
двигателей с короткозамкнутым ротором марки 4А112М4У3 с $P_n = 5,5$ кВт и АД марки 4А315S4У3 с $P_n = 160$ кВт.

Под динамической характеристикой понимаем воспроизведение нелинейной статической характеристики и динамического момента при пуске АД [24].

Как видно из представленных выше динамических механических характеристик, при отклонении напряжения происходит искажение формы характеристик. Величина искажения характеризуется изменением формы характеристики от формы при симметрии питающих напряжений. Соответственно, чем больше изменение формы характери-

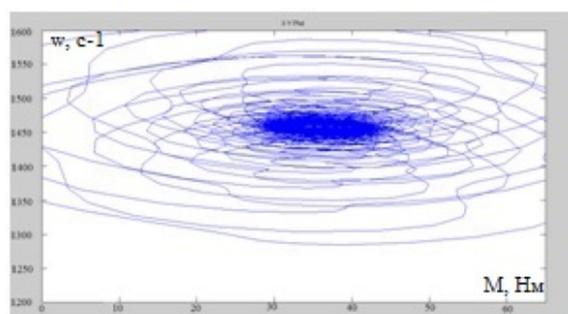


а)

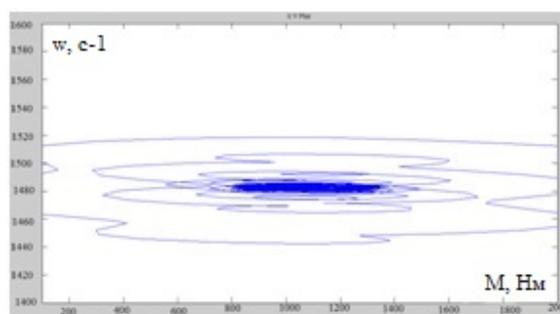


б)

Рис. 5. Динамическая механическая характеристика АД $P_n = 5,5$ кВт (а), $P_n = 160$ кВт (б) при значении отклонений фазных напряжений от $U_{ном}$. Фаза А -10% , фаза В -10% , фаза С -10%

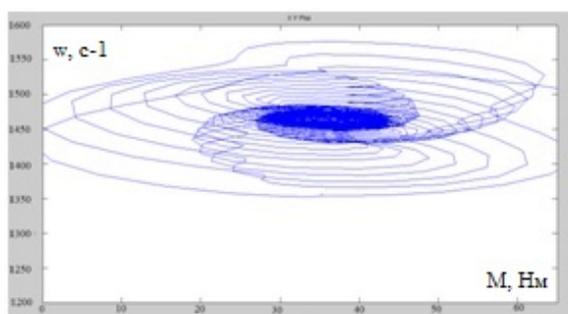


а)

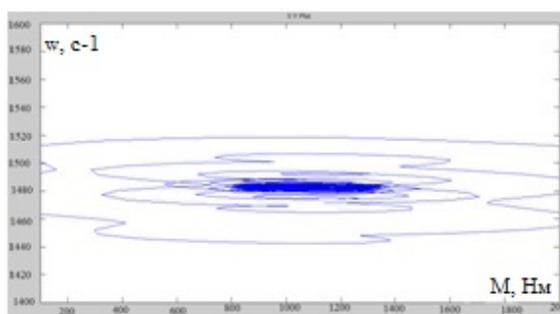


б)

Рис. 6. Динамическая механическая характеристика АД $P_n = 5,5$ кВт (а), $P_n = 160$ кВт (б) при значении отклонений фазных напряжений от $U_{ном}$. Фаза А -5% , фаза В 0% , фаза С -5%



а)



б)

Рис. 7. Динамическая механическая характеристика АД $P_n = 5,5$ кВт (а), $P_n = 160$ кВт (б) при значении отклонений фазных напряжений от $U_{ном}$. Фаза А $+5\%$, фаза В 0% , фаза С $+5\%$

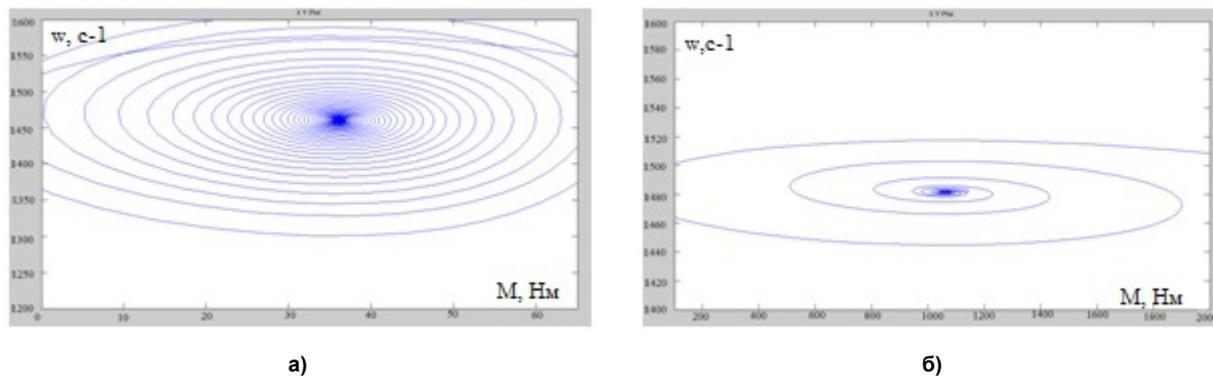


Рис. 8. Динамическая механическая характеристика АД $P_n = 5,5$ кВт (а), $P_n = 160$ кВт (б) при значении отклонений фазных напряжений от $U_{ном}$. Фаза А 0 %, фаза В 0 %, фаза С 0 %

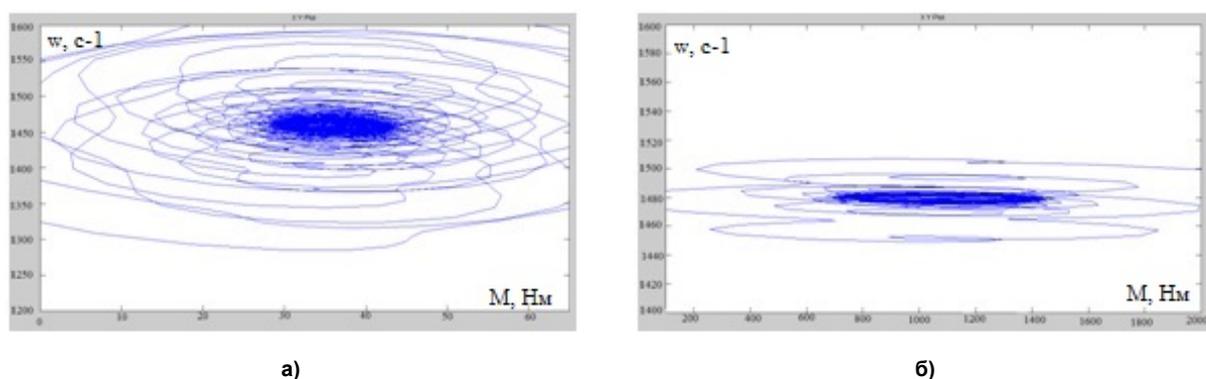


Рис. 9. Динамическая механическая характеристика АД $P_n = 5,5$ кВт (а), $P_n = 160$ кВт (б) при значении отклонений фазных напряжений от $U_{ном}$. Фаза А 0 %, фаза В 0 %, фаза С -5 %

стики, тем больше искажение. Исходя из вида характеристик, можно сделать вывод, что данное отклонение оказывает большее влияние на АД меньшей мощности, чем большей. Причиной этого, несомненно, является большая величина момента инерции двигателя.

Примером этого является сравнение двух динамических механических характеристик. При отклонении напряжения на фазе «С» на +5 % от номинального у АД $P_n = 5,5$ кВт наблюдается встречно-воронкообразная форма изменения характеристики, при аналогичном питающем напряжении на зажимах АД с номинальной мощностью 160 кВт наблюдается искаженная по окружности спираль. На основании полученных зависимостей можно сделать вывод о том, что на обмотки электродвигателей воздействуют сложные механические усилия, причем на двигателе малой мощности наблюдается более сложная картина. Это свидетельствует о появлении сил, воздействующих на статор в различных направлениях [25]. Следовательно, длительное воздействие подобных сил может привести АД к преждевременному выходу из строя.

4. Анализ зависимостей фазных токов от k_{2U} и отклонения напряжений

Далее рассмотрим статические характеристики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором марки 4A112M4Y3 с $P_n = 5,5$ кВт и АД марки 4A315S4Y3 с $P_n = 160$ кВт.

Наблюдая за динамикой изменения токов можно сделать вывод, что сила Ампера при резких колебаниях тока может оказывать разрушающие воздействия на конструкционные детали механизмов АД [26].

Основываясь на графиках изменения токов в фазах АД от k_{2U} (см. рис. 12, 13), можно сделать вывод, что величины токов в наиболее загруженной фазе таковы, что позволяют судить о возможности вывода аналитической зависимости величины тока в фазе от k_{2U} , что представляет собой интерес при дальнейшем исследовании режимов работы АД в условиях несимметрии напряжений.

Изменяя напряжение в определенном диапазоне, убедились в том, что отклонение напряжения оказывает существенное влияние на работу и срок службы АД. Длительное либо часто повторяющееся несимметричное отклонение напряжения может привести к выходу из строя АД, при условии

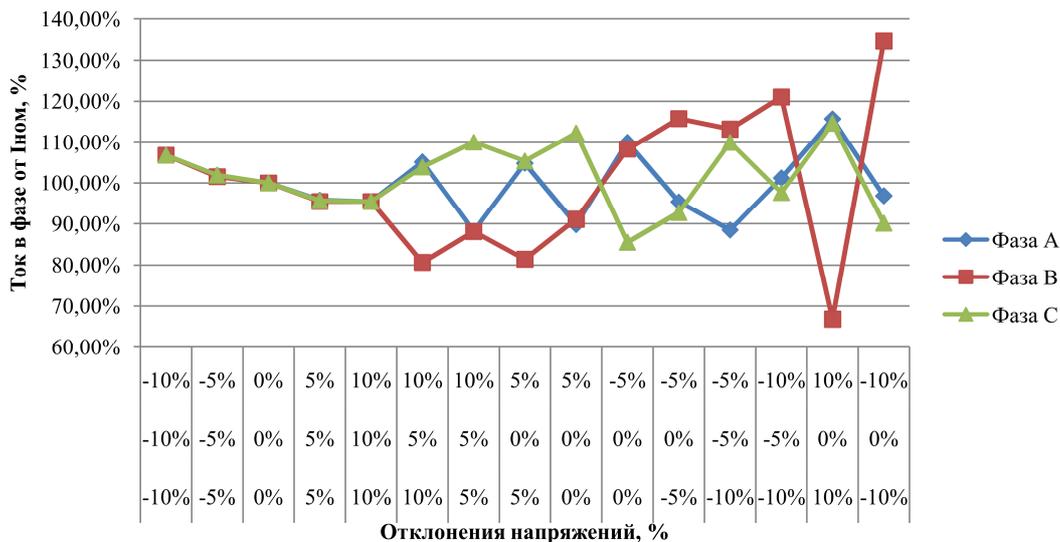


Рис. 10. График изменения токов в зависимости от отклонения фазных напряжений на зажимах электродвигателя с номинальной мощностью $P_n = 5,5$ кВт

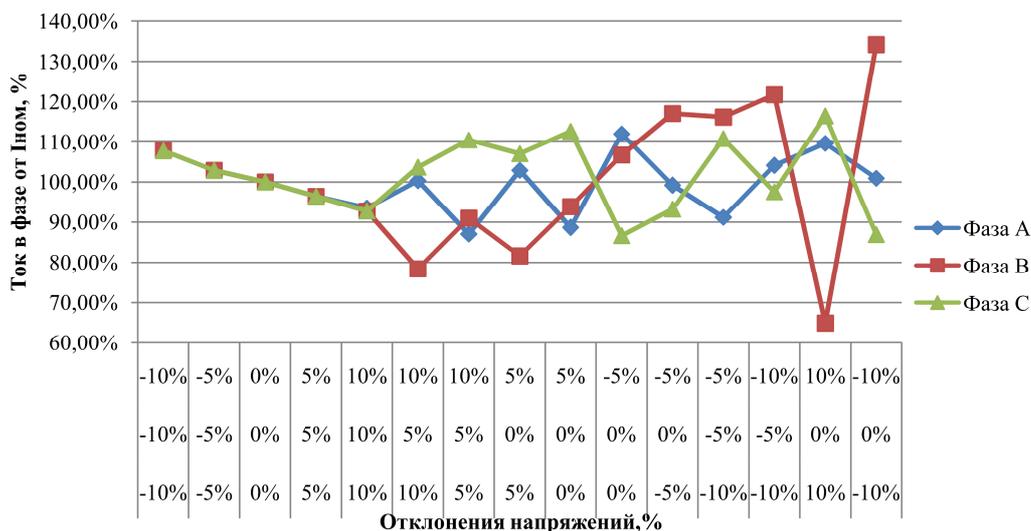


Рис. 11. График изменения токов в зависимости от отклонения фазных напряжений на зажимах электродвигателя с номинальной мощностью $P_n = 160$ кВт

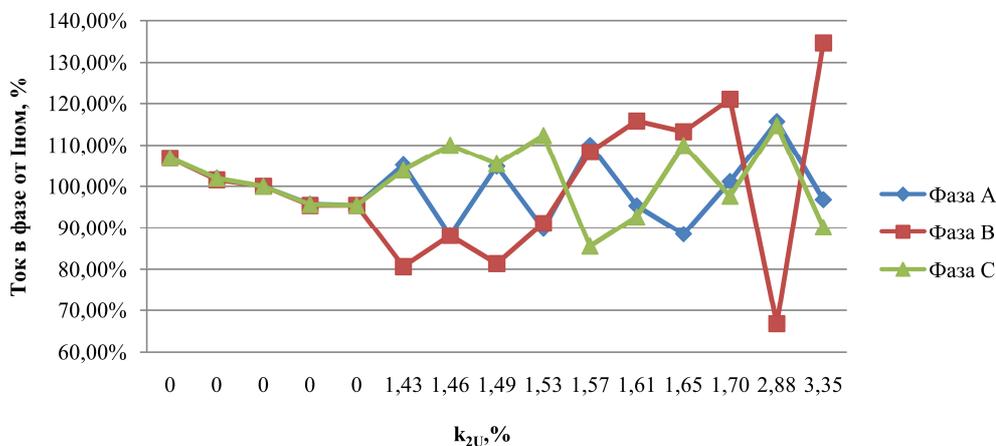


Рис. 12. График изменения токов в фазах в зависимости от k_{2U} для электродвигателя с номинальной мощностью $P_n = 5,5$ кВт

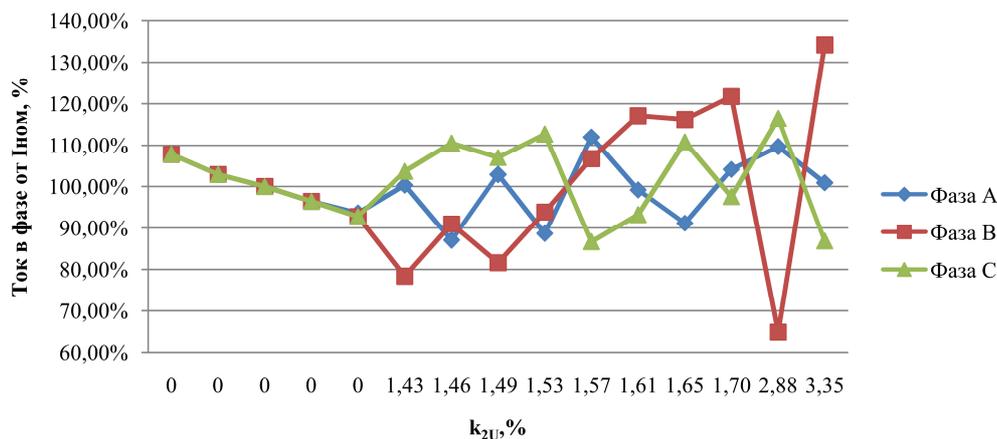


Рис. 13. График изменения токов в фазах в зависимости от k_{2U} для электродвигателя с номинальной мощностью $P_n = 160$ кВт

отсутствия тепловой защиты, установленной в конструкции двигателя, так как удаленные тепловые защиты полноценно не отработают при данном режиме работы АД.

Заключение

На основе компьютерного моделирования выполнено исследование статических и динамических характеристик в различных режимах работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Разработанная модель позволяет выявить некоторые проблемные режимы, при которых может наблюдаться нестабильная работа АД при возникновении тормозных и пульсирующих моментов сил. Так ($P_n = 5,5$ кВт) при отклонении напряжения от $U_{ном}$ на одной из фаз на -5% наблюдается перегрузка по току на 9% от $I_{ном}$ по двум фазам, по третьей снижение тока. При ($P_n = 160$ кВт) наблюдается перегрузка на -5% по току на 11% от $I_{ном}$ по одной фазе, по оставшимся небольшое превышение от 1 до 5% от $I_{ном}$.

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 10–13) показал, что отклонения напряжений одинаковой величины на трех фазах вызывают изменения тока по закону близкому к линейному.

При отклонении напряжений в двух фазах на $+10\%$ (см. рис. 13) и коэффициенте несимметрии напряжений по обратной последовательности $k_{2U} = 2,88\%$ величина отклонения тока в фазах $I = 1,16I_{ном}$. При отклонении напряжений в двух фазах на -10% (см. рис. 13) и коэффициенте несимметрии напряжений по обратной последовательности $k_{2U} = 1,7\%$, величина отклонения тока в фазах $I = 1,21I_{ном}$. Режим работы АД, при отклонении напряжений в меньшую сторону (-10%) более опасен с точки зрения нагрева обмоток двигателя. Однако однозначно сказать, что режим работы АД при отклонении напряжений в большую сторону ($+10\%$) стабильнее нельзя, так как в этом случае наблюдается более значительная несимметрия фазных токов.

С помощью данной модели возможно исследование режимов работы АД при несимметрии фазных напряжений с целью выявления проблем при эксплуатации электродвигателей.

Полученные результаты исследования будут востребованы при настройке релейной защиты электродвигателей в условиях несимметрии напряжений. Также возможно применение для разработки и настройки программ управления частотно-регулируемого электропривода, в условиях изменения отклонения питающего напряжения.

Литература

1. Хомутов, С.О. Система повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции / С.О. Хомутов. – <http://tekhnosfera.com/sistema-povysheniya-nadezhnosti-elektrodvigateley-v-selskom-hozyaystve-na-osnove-kompleksnoy-diagnostiki-i-effektivnoy-te#ixzz456v53hmH> (дата обращения: 27.03.2016)
2. Босый, Д.А. Комплексная оценка показателей качества электроэнергии на тяговых подстанциях переменного тока / Д.А. Босый // Наука та прогрес транспорту. – Днепропетровск: Днепропетров. нац. ун-т ж.-д. транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2013. – С. 30–37.
3. Романова, В.В. Анализ качества электрической энергии систем электроснабжения нетяговых потребителей электрифицированных железных дорог / В.В. Романова, Д.А. Дейс, В.А. Кац // Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки: материалы III междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. – North Charleston, USA, 2014. – Т. 2. – С. 187–191.
4. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – № 1. – С. 66–69.
5. Малахов, П.С. Как много теряет экономика на качестве электроэнергии / П.С. Малахов // Культура, наука, образование: проблемы и пер-

спективы: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. – Нижневартовск: Нижневартов. гос. ун-т, 2014. – С. 70–73.

6. Шакиров, В.А. Исследование влияния несимметрии напряжений на работу асинхронных двигателей / В.А. Шакиров, А.М. Сыровешкин, О.А. Буянина // Труды Братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки. – Братск: БрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 8–11.

7. Чемоданов, Е.В. Оценка влияния несимметрии, несинусоидальности и отклонения напряжения на работу электрооборудования предприятия агропромышленного комплекса / Е.В. Чемоданов // Вестник Чувашского университета. – Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова. – 2012. – № 3. – С. 175–180.

8. Радин, В.И. Электрические машины: асинхронные машины / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович; под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

9. Сипайлов, Г.А. Электрические машины (специальный курс) / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков. – М.: Высшая школа, 1987.

10. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справ. / А.Э. Кравчик, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982.

11. ГОСТ Р 52776–2007 (МЭК 60034-1-2004) Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. – М.: Стандартинформ, 2008. – 68 с.

12. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В.И. Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 573 с.

13. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

14. Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины: лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов. – СПб.: Корона-принт, 2003. – 256 с.

15. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower Systems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс: СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

16. Материалы по продуктам MATLAB & Toolboxes. – <http://matlab.exponenta.ru/> (дата обращения: 28.02.2016).

17. Ануфриев, И.Е. Самоучитель MatLab 5.3/6.x / И.Е. Ануфриев. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.

18. Романова, В.В. Построение компьютерной модели для исследования режимов работы асинхронного двигателя / В.В. Романова, С.В. Хромов // Развитие технических наук в современном мире: сб. науч. тр. по итогам II междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж: ИЦРОН, 2015. – С. 35–41.

19. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

20. Суднова, В.В. Качество электрической энергии / В.В. Суднова. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2000. – 80 с.

21. Основы электромагнитной совместимости: учеб. для вузов / под ред. д-ра техн. наук, проф. Р.Н. Карякина; Алтайский гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: ОАО «Алтайский полиграфический комбинат», 2007 – 479 с.

22. Романов, В.В. Показатели качества электроэнергии: учеб. пособие для студентов спец. 1–43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» высш. учеб. заведений / В.В. Романов. – Минск: БНТУ, 2005.

23. Управление качеством электрической энергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 26–28 ноября 2014 г. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг Радуга», 2014. – 380 с.

24. Яруллин, Р.Б. К вопросу динамической характеристики асинхронного двигателя / Р.Б. Яруллин, А.В. Линенко // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – Уфа: УГУЭС, 2013. – № 2. – С. 42–46.

25. Шубов, И.Г. Шум и вибрации электрических машин / И.Г. Шубов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.

26. Казаков, Ю.Б. Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при конструктивных и режимных вариациях: учеб. пособие для вузов / Ю.Б. Казаков – М.: Издат. дом МЭИ, 2013. – 152 с.

Суворов Иван Флегонтович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ivan.suvogov.1947@mail.ru.

Романова Виктория Викторовна, аспирант, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», Забайкальский государственный университет, г. Чита; romanova181@mail.ru.

Хромов Сергей Владимирович, аспирант, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», Забайкальский государственный университет, г. Чита; sergeixrom@inbox.ru.

Поступила в редакцию 21 июня 2016 г.

INVESTIGATION OF PHASE VOLTAGE ASYMMETRY INFLUENCE ON ASYNCHRONOUS MOTOR MODES IN MATLAB/Simulink SIMULATION ENVIRONMENT

I.F. Suvorov¹, *ivan.suvorov.1947@mail.ru*,
V.V. Romanova², *romanova181@mail.ru*,
S.V. Khromov², *sergeixrom@inbox.ru*

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

The paper considers the issues of investigation of asynchronous motors (AM) of different capacity equipped with the A4 cage rotor based on analytical calculations and simulation with the Matlab software complex and Simulink package.

The main purpose of this investigation is the analysis of influence of phase voltage asymmetry caused by phase voltage deviations on AM modes. The value of voltage deviation was changed with 5 % pitch, the limit value of voltage deviation being 10 % of the nominal one.

Static and dynamic mechanical characteristics of motors, dependencies of electric motor phase currents on the voltage deviation values demonstrating a quantitative and qualitative influence of voltage deviation in one or more phases at simultaneous connection of three-phase and a high single-phase load were investigated.

Obtained simulation results may be used at developing methods, software and hardware providing a prompt response to supply voltage deviation changes under significant non-linear asymmetric loads.

Keywords: MATLAB/Simulink simulation, voltage deviation, asynchronous motor, asynchronous motor modes, voltage asymmetry.

References

1. Khomutov S.O. *Sistema povysheniya nadezhnosti elektrodvigateley v sel'skom khozyaystve na osnove kompleksnoy diagnostiki i effektivnoy tekhnologii vosstanovleniya izolyatsii* [System Improving Reliability of Electric Motors in Agriculture on the Basis of Comprehensive Diagnostics and Effective Technologies of Insulation Restoring]. Available at: <http://tekhnosfera.com/sistema-povysheniya-nadezhnosti-elektrodvigateley-v-selskomkhozyaystve-na-osnove-kompleksnoy-diagnostiki-i-effektivnoy-te#ixzz456v53hmH> (accessed 27.03.2016)
2. Bosyy, D.A. [Complex Evaluation of Power Quality Indicators of AC Traction Substations]. *Nauka ta progres transportu*. Dnepropetrovsk, Academician V. Lasaryan Dnepropetrovsk National University of Railway Transport, 2013, pp. 30–37.
3. Romanova V.V., Deys D.A., Kats V.A. [Analysis of Power Quality of Power Supply System of Non-Tractive Consumers of Electrified Railways]. *Fundamental'naya nauka i tekhnologii – perspektivnye razrabotki. Materialy III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sbornik trudov v trekh tomakh. Tom 2* [Fundamental Science and Technologies – Advanced Developments. Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference. Collected Papers in Three Volumes. Vol. 2]. North Charleston, USA, 2014, pp. 187–191.
4. Chepmen D. [Actual Price of Low-Quality Electric Power]. *Energoberezhenie*, 2004, no. 1, pp. 66–69. (in Russ.)
5. Malakhov P.S. [Economic Losses due to Poor Power Quality]. *Kul'tura, nauka, obrazovanie: problemy i perspektivy. Materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Culture, Science and Education: Issues and Prospects. Proceedings of the Third All-Russian Science and Practical Conference]. Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk State University, 2014, pp. 70–73. (in Russ.)
6. Shakirov V.A., Syroveshkin A.M., Buyanina O.A. [Investigation of Voltage Asymmetry Influence on Operation of Asynchronous Motors]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye i inzhenernye nauki* [Collected Papers of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences]. Bratsk, BrGU, 2011, vol. 2, pp. 8–11. (in Russ.)
7. Chemodanov E.V. [Estimation of Influence of Voltage Asymmetry, Nonsinusoidality and Voltage Deviation on Operation of Agroindustrial Complex Equipment]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Bulletin of Chuvash State University], 2012, no. 3, pp. 175–180. (in Russ.)
8. Radin V.I., Bruskin D.E., Zorokhovich A.E. *Elektricheskie mashiny: asinkhronnye mashiny* [Electrical Machines: Asynchronous Machines]. Moscow, Energoatomizdat, 1988.
9. Sipaylov G.A., Kononenko E.V., Khor'kov K.A. *Elektricheskie mashiny (spetsial'nyy kurs)* [Electrical Machines]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ, 1987.

10. Kravchik A.E., Sobolenskaya E.A. *Asinkhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik* [4A Asynchronous Motors: Reference]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982.
11. GOST R 52776–2007 (MEK 60034-1–2004) *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Nominal'nye dannye i kharakteristiki* [Rotating Electrical Machines. Rating and Performance]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 68 p.
12. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda: ucheb. dlya vuzov* [Theory of Electric Drive: Textbook for Higher Schools], 2-nd ed., updated and revised. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 573 p.
13. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical Modeling Electrical Machines]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2001. 327 p.
14. German-Galkin S.G., Kardonov G.A. *Elektricheskie mashiny: laboratornye raboty na PK* [Electrical Machines: PC-based Laboratory Operation Manual]. Saint Petersburg, Korona-Print, 2003. 256 p.
15. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPower Systems i Simulink* [Simulation of Electrical Devices in MATLAB, Simulink and SimPower Systems]. Moscow, DMK Press Publ., Saint Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
16. *Materialy po produktam MATLAB & Toolboxes* [MATLAB & Toolboxes products]. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/> (accessed 28.02.2016)
17. Anufriev I.E. *Samouchitel' MatLab 5.3/6.h*. [MatLab 5.3/6.x. Tutorial]. Saint Petersburg, BHV–Peterburg Publ., 2003. 736 p.
18. Romanova V.V., Khromov S.V. [Development of Simulation Model for Study of Operation Modes of Asynchronous Engine]. *Razvitie tekhnicheskikh nauk v sovremennom mire. Sbornik nauchnykh trudov po itogam II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Present Development of Engineering Sciences. Proceedings of the Second International Science and Practice Conference]. Voronezh, ITcRON Publ., 2015, pp. 35–41. (in Russ.)
19. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektroobrazovaniya obshchego naznacheniya* [Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
20. Sudnova V.V. *Kachestvo elektricheskoy energii* [Electric Power Quality]. Moscow, ZAO “Energoservis” Publ., 2000. 80 p.
21. Karyakin R.N. (Ed.) *Osnovy elektromagnitnoy sovmestimosti: uchebnyk dlya vuzov* [Basics of Electromagnetic Compatibility]. Altai State Technical University. Barnaul, Altayskiy poligraficheskiy kombinat Publ., 2007. 479 p.
22. Romanov V.V. *Pokazateli kachestva elektroenergii: uchebnoe posobie* [Unified Power Quality Index: Textbook]. Minsk, BNTU, 2005.
23. *Upravlenie kachestvom elektricheskoy energii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva, 26–28 noyabrya 2014 g.* [Power Quality Management. Proceedings of the International Science and Practice Conference. Moscow, 26–28 November 2014]. Moscow, “Tsentr poligraficheskikh uslug Raduga” Publ., 2014. 380 p.
24. Yarullin R.B., Linenko A.V. [Dynamic Behavior of Asynchronous Motor]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy* [Electrotechnical Complexes and Systems]. Ufa, UGUJeS, 2013, no. 2, pp. 42–46. (in Russ.)
25. Shubov I.G. *Shum i vibratsii elektricheskikh mashin* [Noise and Vibration of Electrical Machines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986.
26. Kazakov Yu.B. *Energoeffektivnost' raboty elektrodvigateley i transformatorov pri konstruktivnykh i rezhimnykh variatsiyakh: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Energy Efficiency of Design and Operating Versions of Electric Motors and Transformers: Textbook for Higher Schools]. Moscow, MEI Publ., 2013. 152 p.

Received 21 June 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Суворов, И.Ф. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink / И.Ф. Суворов, В.В. Романова, С.В. Хромов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 72–83. DOI: 10.14529/power160309

FOR CITATION

Suvorov I.F., Romanova V.V., Khromov S.V. Investigation of Phase Voltage Asymmetry Influence on Asynchronous Motor Modes in MATLAB/Simulink Simulation Environment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 72–83. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160309