

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

Идентификация асинхронной нагрузки

В.П. Закарюкин^{1, a}, А.В. Крюков^{1, b}, Ле Конг Зань^{2, c}¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского 15, Иркутск, Россия²Иркутский государственный технический университет, Лермонтова 83, Иркутск, Россия^azakar49@mail.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^cdanh_lecong150287@mail.ru

Статья поступила 21.03.2014, принята 6.05.2014

Для создания интеллектуальных систем электроснабжения необходима разработка методов моделирования, обеспечивающих высокую точность определения различных режимов, в том числе и сложносимметричных. Такие методы можно эффективно реализовать на основе фазных координат, являющихся наиболее естественной формой представления многофазных цепей. Из-за малого сопротивления обратной последовательности асинхронная нагрузка создает эффект снижения несимметрии в точках ее подключения. Поэтому для адекватного моделирования несимметричных режимов систем электроснабжения требуется корректный учет асинхронной нагрузки. Адекватные модели асинхронного электродвигателя, реализованные в фазных координатах, предложены в работах Иркутского государственного университета путей сообщения. Эффективное использование таких моделей возможно только при наличии точных данных о параметрах схем замещения асинхронного двигателя для прямой и обратной последовательностей. Анализ показывает, что методики определения указанных параметров на основе справочных данных могут давать заметно различающиеся результаты. Преодоление указанной трудности возможно на основе применения методов параметрической идентификации в фазных координатах. В статье предложена методика параметрической идентификации моделей отдельных асинхронных электродвигателей и узлов асинхронной нагрузки. Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать вывод о том, что с помощью параметрической идентификации можно получить эквивалентную модель узла асинхронной нагрузки, обеспечивающую высокую точность расчетов как симметричных, так и несимметричных режимов. Варьирование режимных параметров показало корректную работу модели в широком диапазоне их изменения.

Ключевые слова: системы электроснабжения, несимметричные режимы, асинхронная нагрузка, параметрическая идентификация.

Identification of asynchronous loading

V.P. Zakaryukin^{1, a}, A.V. Kryukov^{1, b}, Danh Le Cong^{2, c}¹Irkutsk State Transport University, 15 Chernishevsky St., Irkutsk, Russia²Institute State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia^azakar49@mail.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^cdanh_lecong150287@mail.ru

Received 21.03.2014, accepted 6.05.2014

Development of modeling methods providing high precision of various modes definition is necessary for creation of power supply intellectual systems, including asymmetrical modes. Such methods can be realized effectively on the basis of the phase coordinates which are the most natural form of multiphase chains representation. Small asynchronous loading resistance of negative sequence creates effect of asymmetry decrease in points of its connection. Therefore adequate modeling of power supply asymmetrical modes requires the correct accounting of asynchronous loading. The adequate models of the asynchronous electric motor realized in phase coordinates are offered in works of Irkutsk state transport university. Effective use of such models possibly only in the presence of exact parameters of positive and negative sequences asynchronous engine equivalent circuits. The analysis shows that techniques of specified parameters determination on the basis of reference data can yield much differing results. Overcoming of the specified difficulty is possible on the basis of parametrical identification methods in phase coordinates. In this article the technique of model parametrical identification of separate asynchronous electric motors and nodes of asynchronous loading is offered. Results of computer modeling allow drawing a conclusion that by means of parametrical identification it is possible to receive equivalent model of asynchronous loading node, providing high precision of calculations both symmetric and asymmetrical modes. It should be noted correct work of model in the wide range of regime parameters change.

Keywords: power supply systems, asymmetrical modes, asynchronous loading, parametrical identification.

Введение. При создании интеллектуальных систем технологиям smart grid [1], необходима разработка электроснабжения (СЭС), выполненных по методов моделирования СЭС, обеспечивающих

высокую точность определения различных режимов, в том числе и сложносимметричных. Такие методы должны формироваться на основе фазных координат, являющихся наиболее естественной формой представления многофазных цепей [2...12]. Адекватное моделирование несимметричных режимов требует корректного учета асинхронной нагрузки (АН), создающей ввиду малого сопротивления обратной последовательности эффект снижения несимметрии в точках ее подключения. Корректные модели асинхронного электродвигателя (АЭД) в фазных координатах предложены в работах [2, 3]. Модели узлов АН для фазных координат рассмотрены в работе [13], однако эффективное использование таких моделей возможно только при наличии точных данных о параметрах $X_k, R_2, X_{kp}, R_{2p}, X_\mu$ схем замещения АЭД для прямой и обратной последовательностей (рис. 1). Анализ показывает, что методики [14...16] определения указанных параметров на основе справочных данных дают заметно различающиеся результаты.

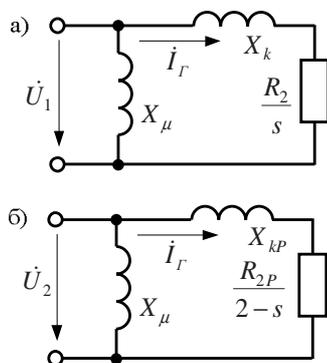


Рис. 1. Схемы замещения прямой и обратной последовательностей

Преодоление указанной трудности возможно на основе применения методов параметрической идентификации [7, 10, 17]. В статье предлагается методика параметрической идентификации модели АЭД в фазных координатах. Результаты идентификации могут использоваться при решении задач диагностики АЭД на основе алгоритмов, описанных в работе [18], а также при расчете режимов сложных СЭС.

Методика идентификации асинхронного электродвигателя. Параметры X_k, R_2, X_{kp}, R_{2p} могут быть определены на основе измерений комплексов токов, потребляемых двигателем, и напряжений на его зажимах, а также скорости его вращения. Для решения этой задачи необходимо знание сопротивления ветви намагничивания X_μ . Этот параметр может быть найден на основе дополнительных измерений, например, в режиме холостого хода, или определен по косвенной методике, описанной ниже.

При известном значении X_μ параметры схемы замещения прямой последовательности могут быть найдены на основе измерений фазовых токов и

напряжений на зажимах АЭД, а также скорости вращения (скольжения s) на основе следующего соотношения:

$$\underline{Z}_{D1} = \frac{jX_\mu \underline{Z}_k}{jX_\mu + \underline{Z}_k}, \quad (1)$$

где $\underline{Z}_k = \frac{R_2}{s} + jX_k$; $\underline{Z}_{D1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$; \dot{U}_1, \dot{I}_1 – комплексы тока и напряжения прямой последовательности, определяемые на основе измерений фазных токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ и напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ по известным соотношениям метода симметричных составляющих. Измерения могут проводиться как в симметричных, так и в несимметричных режимах.

На основании (1) можно записать следующее:

$$\underline{Z}_k = \frac{jX_\mu \underline{Z}_{D1}}{jX_\mu - \underline{Z}_{D1}}.$$

При известном скольжении s из последней формулы может быть определен параметр R_2 .

Параметры схемы замещения обратной последовательности могут быть найдены по формулам, аналогичным приведенным выше:

$$\underline{Z}_{kp} = \frac{R_{2p}}{2-s} + jX_{kp} = \frac{jX_\mu \underline{Z}_{D2}}{jX_\mu - \underline{Z}_{D2}};$$

$$\underline{Z}_{D2} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2},$$

где \dot{U}_2, \dot{I}_2 – комплексы тока и напряжения обратной последовательности, определяемые на основе измерений фазных токов и напряжений. Для получения приемлемой точности параметры пускового режима следует находить в режиме с большой несимметрией напряжений (k_{2U} порядка 10 %).

Сопротивление X_μ можно определить по данным справочника [19]. Для этого потребуется только информация о номинальном напряжении и номинальной мощности двигателя. Приемлемая точность определения X_μ может быть получена на основе нелинейной аппроксимации следующего вида:

$$X_{\mu*} = X_{\mu0} [1 + \Delta X_\mu (1 - e^{-\alpha P})]. \quad (2)$$

Параметры $X_{\mu0}, \Delta X_\mu, \alpha$ для мощностей АЭД, превышающих 5 кВт, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры аппроксимации зависимости

$$X_{\mu*} = X_{\mu*}(P)$$

Параметр	750 об/мин	1000 об/мин	1500 об/мин	3000 об/мин
$X_{\mu0}, \text{ о.е.}$	1,4	1,7	2,0	2,3
$\Delta X_\mu, \text{ о.е.}$	1,0	1,2	1,4	1,4

$\alpha, \text{кВт}^{-1}$	0,04	0,05	0,045	0,04
---------------------------	------	------	-------	------

Полученное значение X_{μ^*} необходимо умножить на базисное сопротивление, определяемое по номинальным параметрам АЭД.

Результаты идентификации. Исходная информация в виде модулей и углов тока и напряжения, а также скольжения формировалась на основе компьютерного моделирования с помощью программного комплекса «Fazonord-Качество» [2, 3]. Для этого в программном комплексе была создана схема замещения АЭД номинальной мощностью 90 кВт. В полученные токи и напряжения рассчитанного режима вводились погрешности, отвечающие классам точности измерительных приборов 0.1, 0.2, 0.5 и 1. Сопротивление X_{μ} вычислялось на основе выражения (2).

Результаты идентификации представлены на рис. 2. Параметр R_2 определялся с погрешностью, близкой к нулю.

Полученные результаты показывают, что для получения приемлемой точности идентификации следует использовать измерительные средства с классом точности, обеспечивающим максимальную погрешность не более 0.2 %.

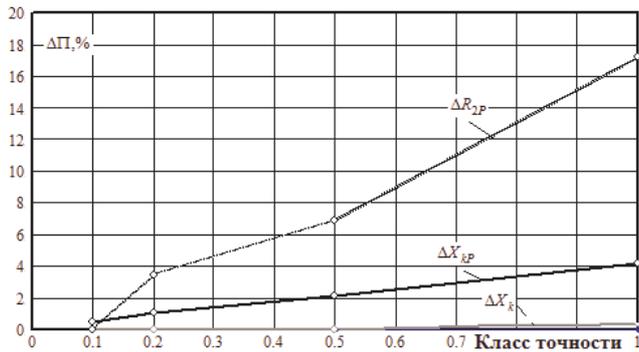


Рис. 2. Погрешности идентификации

Предложенная методика может использоваться для решения задачи параметрической идентификации группы АЭД, подключенной к узловой точке электрической сети. Для подтверждения этой возможности выполнена идентификация узла АН, схема которого показана на рис. 3. Параметры АЭД сведены в табл. 2. Эквивалентная схема приведена на рис. 4.

Таблица 2

Параметры АЭД узла

$P_H, \text{кВт}$	КПД, %	$\cos \phi$ о.е.	$R_2, \text{о.е.}$	$X_k, \text{о.е.}$	$R_{2P}, \text{о.е.}$	$X_{kP}, \text{о.е.}$	$X_{\mu^*}, \text{о.е.}$
45	92	0,9	0,017	0,222	0,034	0,16	4,6
110	92,5	0,9	0,019	0,282	0,048	0,21	4,9
160	93,5	0,91	0,017	0,257	0,045	0,19	4,6

При проведении идентификации скольжение задавалось на основе данных для эквивалентного АЭД, приведенных в работе [19].

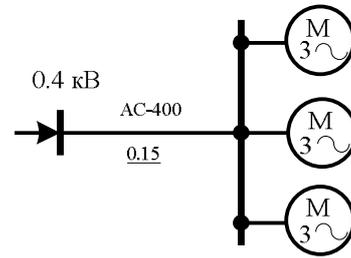


Рис. 3. Исходная схема

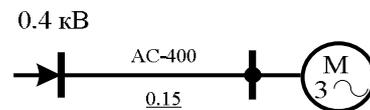


Рис. 4. Эквивалентная схема

Погрешности расчета режима, возникающие при использовании эквивалентной модели узла АН, полученной на основе параметрической идентификации, приведены в табл. 3. Абсолютные величины максимальных погрешностей определения параметров режима представлены на рис. 5...7.

Таблица 3

Погрешности идентификации

Параметр	Класс точности			
	0.1	0.2	0.5	1.0
$\delta U_A, \%$	0.04	0.04	0.04	-0.04
$\delta U_B, \%$	0.00	0.00	0.10	0.14
$\delta U_C, \%$	-0.05	-0.05	0.05	0.09
$\delta \phi_{UA}, \text{мин}$	0.66	0.36	0.54	2.34
$\delta \phi_{UB}, \text{мин}$	-0.78	0.42	3.72	4.50
$\delta \phi_{UC}, \text{мин}$	1.20	0.42	-1.26	-1.20
$\delta I_A, \%$	-0.21	-0.25	-0.21	-0.14
$\delta I_B, \%$	0.22	0.10	-1.27	-2.83
$\delta I_C, \%$	-0.12	-0.18	-0.23	-0.17
$\delta \phi_{IA}, \text{мин}$	0.60	-1.20	-6.00	-18.00
$\delta \phi_{IB}, \text{мин}$	3.00	-1.20	-0.60	-6.00
$\delta \phi_{IC}, \text{мин}$	-6.00	0.00	18.60	9.60
$\delta P, \%$	-0.09	-0.18	-0.42	-0.86
$\delta Q, \%$	0.01	0.02	-0.47	-0.41
$\delta \Delta P_L, \%$	-0.25	-0.37	-0.67	-0.89
$\delta \Delta Q_L, \%$	-0.25	-0.37	-0.66	-0.86
$\delta k_{2U}, \%$	0.43	0.43	-0.71	-1.99

Примечания: $\delta U_X, \delta I_X$ – погрешности по модулям напряжений и токов, %; $\delta \phi_{UX}, \delta \phi_{IX}$ – погрешности по фазам напряжений и токов, мин; $\delta P, \delta Q$ – погрешности по активной и реактивной мощностям, потребляемым узлом АН,

%; $\delta\Delta P_L$, $\delta\Delta Q_L$ – погрешности по потерям активной и реактивной мощности в питающей ЛЭП; δk_{2U} – погрешность по коэффициенту несимметрии.



Рис. 5. Максимальные погрешности определения модулей напряжений и токов, а также коэффициента несимметрии по обратной последовательности

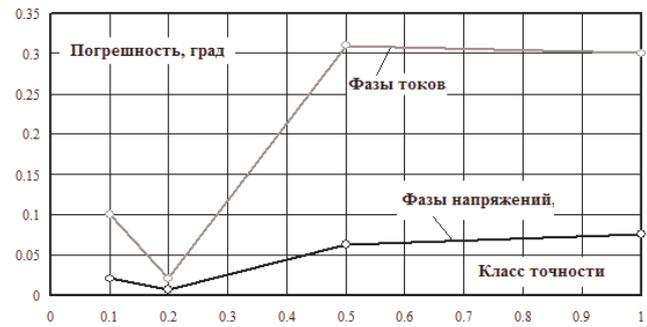


Рис. 6. Максимальные погрешности определения фаз напряжений и токов

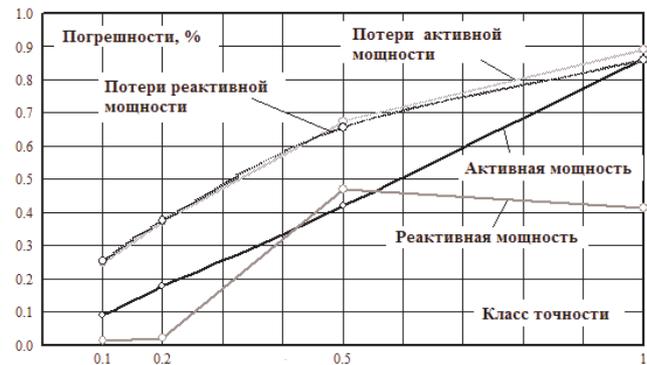


Рис. 7. Максимальные погрешности определения активной и реактивной мощности, потребляемых узлом АН, и потерь мощности в ЛЭП

В табл. 4 и на рис. 8 и 9 представлены статические характеристики $P=P(U_{PH})$, $Q=Q(U_{PH})$, где P , Q – активные и реактивные мощности, потребляемые узлом АН; U_{PH} – фазное напряжение. Эти зависимости построены для исходной и эквивалентной моделей узла АН. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что модель узла АН, сформированная на основе параметрической идентификации, позволяет корректно моделировать узел асинхронной нагрузки в широком диапазоне изменения режимов работы сети.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что с помощью параметрической идентификации

можно получить эквивалентную модель узла асинхронной нагрузки, обеспечивающую высокую точность расчетов как симметричных, так и несимметричных режимов. При этом необходимо особо отметить корректную работу модели в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Таблица 4

Статические характеристики нагрузки

U_{PH} , кВ	Исходная модель		Эквивалентная модель		Различие	
	P , кВт	Q , квар	P , кВт	Q , квар	δP , %	δQ , %
0.18	325	179	324	180	0.19	-0.72
0.19	325	166	324	167	0.19	-0.31
0.21	325	160	324	160	0.19	-0.01
0.22	325	158	324	157	0.19	0.23
0.23	325	157	324	156	0.19	0.43
0.24	325	159	324	158	0.19	0.61
0.25	325	162	324	161	0.19	0.77
0.26	325	166	324	165	0.19	0.90

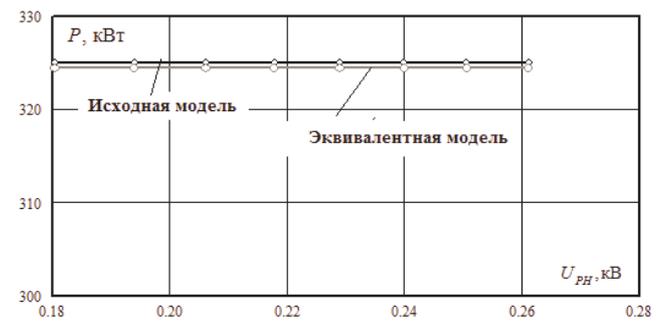


Рис. 8. Статическая характеристика активной мощности

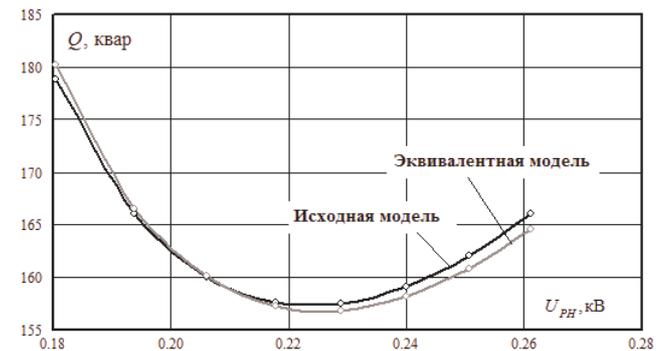


Рис. 9. Статическая характеристика реактивной мощности

Предложенная методика адекватно работает и для схемы узла АН более общего вида, модель которой показана на рис. 10. В этой схеме асинхронные двигатели подключены к шинам узла через кабельные линии. Кроме того, питание узла осуществлялось с помощью шинпровода ШМА4, для моделирования которого использовалась методика, описанная в работе [5].

Результаты моделирования представлены в табл. 5, из которой видно, что эквивалентная модель, имеющая структуру, аналогичную представленной на рис. 4,

обеспечивает приемлемую точность расчета

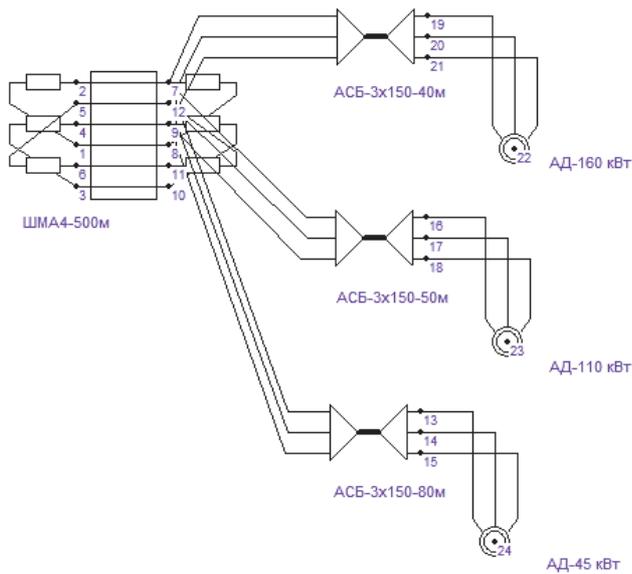


Рис. 10. Модель схемы узла АН

Таблица 5

Погрешности идентификации

Параметры	Результаты расчета режима		Различие, %
	Исходная модель	Эквивалентная модель	
$U_A, В$	0.25	0.25	- 0.04
$U_B, В$	0.21	0.21	- 0.05
$U_C, В$	0.22	0.22	0.00
$\phi_{UA}, ^\circ$	-1.15	-1.16	- 0.01
$\phi_{UB}, ^\circ$	-125.81	-125.80	0.01
$\phi_{UC}, ^\circ$	125.57	125.56	- 0.01
$I_A, А$	755.42	774.75	2.56
$I_B, А$	205.93	223.86	8.71
$I_C, А$	775.42	777.30	1.88
$\phi_{IA}, ^\circ$	130.21	131.09	0.88
$\phi_{IB}, ^\circ$	34.81	30.28	- 4.53
$\phi_{IC}, ^\circ$	- 64.81	- 65.23	0.65
$\Delta P_L, кВт$	5.10	5.26	3.26
$\Delta Q_L, квар$	7.66	7.88	2.82
$P, кВт$	334.53	342.55	2.40
$Q, квар$	184.24	191.50	3.94
$k_{2U}, \%$	10.91	10.89	- 0.18

Заключение

Предложена методика параметрической идентификации моделей отдельных асинхронных электродвигателей и узлов асинхронной нагрузки, обеспечивающая точность расчета режимов,

несимметричного режима. приемлемую для целей проектирования и эксплуатации систем электроснабжения.

Литература

1. Дорوفеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 29-34.
2. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск, 2005. 273 с.
3. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения. 2011. 160 с.
4. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 3. С. 81-87.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Системный подход к моделированию многоамперных шинопроводов // Там же. № 4. С. 68-72.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Моделирование многоамперных шинопроводов // Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 65-73.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация линий электропередачи и трансформаторов. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 96 с.
8. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Применение технологий распределенной генерации для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2009. Т. 37, № 1. С. 190-195.
9. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Расчет электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями электрифицированных железных дорог // Там же. 2011. Т. 48, № 1. С. 148-152.
10. Шульгин М.С., Крюков А.В., Закарюкин В.П. Параметрическая идентификация линий электропередачи на основе фазных координат // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1. С. 140-147.
11. Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Режимы работы системы тягового электроснабжения напряжением 94 кВ с симметрирующими трансформаторами // Вестн. науч.-исслед. ин-та железнодорожного транспорта. 2005. № 3. С. 44-47.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Математические модели узлов нагрузки электроэнергетических систем, построенные на основе фазных координат. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 176 с.
13. Гамазин С.И., Старцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. М.: Изд-во МЭИ, 1997. 424 с.
14. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Вектор науки ТГУ. 2013. № 1 (23). С. 108-112.
15. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кириякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38-42.
16. Здор И.Е., Мосьпан В.А., Родькин Д.И. Анализ методов диагностики асинхронных короткозамкнутых двигателей // Проблемы создания новых машин и технологий. Кременчуг, 1998. Вып. 2.
17. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
18. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.

References

1. Dorofeyev V.V., Makarov A.A. Active and adaptive network – new quality of UES in Russia // Jenergojekspt. 2009. № 4. P. 29-34.2.

2. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. The asymmetrical modes of electric systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Methods of joint modeling of traction and external power supply systems of alternating current railroads. Irkutsk: izd-vo Irkut. gos. un-ta putej soobshhenija. 2011. 160 p.
4. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsentyev M.O. Technologies of the distributed generation on railway transport // *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2008. № 3. P. 81-87.
5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. System approach to modeling the multiampere bus wires // *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2008. № 4. P. 68-72.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. Modeling of the multiampere bus wires // *Problemy jenergetiki*. 2009. № 3-4. P.65-73.
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shulgin M.S. Parametrical identification of power lines and transformers. Irkutsk: ISTU, 2012. 96 p.
8. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsentyev M.O. Application of the distributed generation technologies for power supply of non-traction consumers of the railroads // *Vestn. Irkut. gos. tehn. un-ta*. 2009. Vol. 37, № 1. P. 190-195.
9. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. Calculation of the electromagnetic fields created by railroad traction networks // *Vestn. Irkut. gos. tehn. un-ta*. 2011. Vol. 48, № 1. P. 148-152.
10. Shulgin M.S., Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Parametrical identification of power lines on the basis of phase coordinates // *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2011. № 1. P. 140-147.
11. Bardushko V.D., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modes of 94 kV traction power supply system with symmetrizing transformers // *Vestn. nauch.-issled. in-ta zheleznodorozhnogo transporta*. 2005. № 3. P. 44-47.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of transformers in phase coordinates // *Jelektrotehnika*. 2008. № 5. P. 56-60.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Danh Le Cong. Mathematical models of loading nodes of the electrical power systems, constructed on the basis of phase coordinates. Irkutsk: IrGUPS, 2013. 176 p.
14. Gamazin S.I., Starcev V.A., Ciruk S.A. Transients in systems of the industrial power supply, caused by electromotive loading. M.: Izd-vo MJeI, 1997. 424 p.
15. Makeev M.S., Kuvshinov A.A. Calculation algorithm of equivalent circuit parameters of asynchronous engine by catalog data. // *Vektor nauki TGU*. 2013. № 1 (23). P. 108-112.
16. Moshchinsky Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. Determination of parameters of an equivalent circuit of the asynchronous engine according to catalog data // *Jelektritchestvo*. 1998. № 4. P. 38-42.
17. Zdor I.E., Mospan V.A., Rodkin D. I. Analysis of diagnostics methods of asynchronous short-circuited engines // *Problemy sozdaniya novyh mashin i tehnologij. Kremenchug*, 1998. Vol. 2.
18. Kravchik A.E. Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. Asynchronous engines of a series 4A. *spravochnik*. M.: Jenergoizdat, 1982. 504 p.
19. Gurevich Yu.E. Libova L.E. Hachatryan E.A. Electric systems loading stability. M.: Jenergoizdat, 1981. 208 p.