

УДК: 621.313.004

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

А. С. Бешта, А. А. Сёмин

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»
просп. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 49027, Украина. E-mail: syomin_andrew@mail.ru

Выполнена оценка точности идентификации параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом погрешности в исходных данных с целью формулирования таких условий проведения эксперимента, которые обеспечат приемлемую чувствительность модели к погрешностям. Задача решалась с использованием серии вычислительных экспериментов. Оценивание влияния погрешности производилось следующим образом: значения входных активного и реактивного составляющих входного сопротивления со стороны статора изменялись на величину погрешности (принятую равной $\pm 5\%$). Далее выполнялось нахождение каждого параметра при известных оставшихся параметрах и на основании величины максимального отклонения параметра делался вывод о его чувствительности к погрешности. Были сформулированы рекомендации по определению параметров схемы замещения как при неподвижном, так и при вращающемся роторе. Получено аналитическое выражение, с помощью которого можно определить рекомендуемое значение частоты питающего напряжения при идентификации активного сопротивления ротора и усредненного значения индуктивности рассеивания при неподвижном роторе. Впервые получены численные оценки чувствительности параметров схемы замещения к погрешности в исходных экспериментальных данных. Использование рекомендуемых значений частот питания статора обеспечивает стабильность результатов идентификации параметров схемы замещения к наличию ошибок в исходных экспериментальных данных, избавляя от риска получения недостоверных результатов.

Ключевые слова: идентификация, асинхронный двигатель, схема замещения, чувствительность параметров, математическая модель.

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ

О. С. Бешта, А. О. Сьомін

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»
просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49027, Україна. E-mail: syomin_andrew@mail.ru

Виконано оцінку точності ідентифікації параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором з урахуванням похибки у вихідних даних з метою формулювання таких умов проведення експерименту, які забезпечать прийнятну чутливість моделі до похибок. Завдання вирішувалося з використанням серії обчислювальних експериментів. Оцінювання впливу похибки виконувалося наступним чином: значення вхідних активного й реактивного складових вхідного опору з боку статора змінювалися на величину похибки (прийняту на рівні $\pm 5\%$). Далі виконувалося знаходження кожного параметра при відомих інших параметрах і на підставі величини максимального відхилення параметра робився висновок про його чутливість до похибки. Були сформульовані рекомендації щодо визначення параметрів схеми заміщення як при нерухомому, так і при рухомому роторі. Отримано аналітичний вираз, за допомогою якого можна визначити рекомендоване значення частоти напруги живлення при ідентифікації активного опору ротора й усередненого значення індуктивності розсіювання при нерухомому роторі. Уперше отримано чисельні оцінки чутливості параметрів схеми заміщення до похибки у вихідних експериментальних даних. Використання рекомендованих значень частот живлення статора забезпечує стабільність результатів ідентифікації параметрів схеми заміщення до наявності похибок у вихідних експериментальних даних, позбавляючи від ризику отримання недостовірних результатів.

Ключові слова: ідентифікація, асинхронний двигун, схема заміщення, чутливість параметрів, математична модель.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. На результат идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором влияют ошибки, содержащиеся в исходных экспериментальных данных, которые определяются величиной суммарной ошибки используемых датчиков тока и напряжения [1]. С другой стороны, математическая модель асинхронного двигателя (и, соответственно, его схема замещения) получена на основании упрощений и не может быть тождественна

оригиналу, поэтому возникает вопрос об оценке точности идентификации параметров модели с учетом погрешности в исходных данных.

Решение данной задачи позволит сформулировать такие условия проведения эксперимента, которые обеспечат приемлемую чувствительность модели к погрешностям. Данная задача является актуальной как в контексте использования информации о параметрах для настройки регуляторов системы управления электроприводом, так и при диагности-

ровании состояния электрических машин электротехнических комплексов. Стоит отметить, что данный вопрос является малоизученным и практически не освещается в статьях, касающихся идентификации параметров асинхронного привода (АП).

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

При математическом описании электромагнитных процессов в асинхронном двигателе обычно делаются следующие допущения [2–5]:

- трехфазная система симметрична, нулевой ток отсутствует;
- магнитодвижущая сила (МДС) синусоидально распределена по окружности воздушного зазора машины;
- сложение МДС отдельных фазных обмоток порождает общую магнитную индукцию, так же синусоидально распределенную по окружности воздушного зазора;
- характеристика намагничивания линейна.

Рассмотрение в стационарном режиме синусоидального напряжения, приложенного к одной фазе статорной обмотки, токов в обмотке статора и ротора и потокосцеплений, образованных этими токами, приводит к схеме замещения асинхронного двигателя. Получаемая при этом Т-образная схема замещения (для заторможенного ротора) представлена на рис. 1.

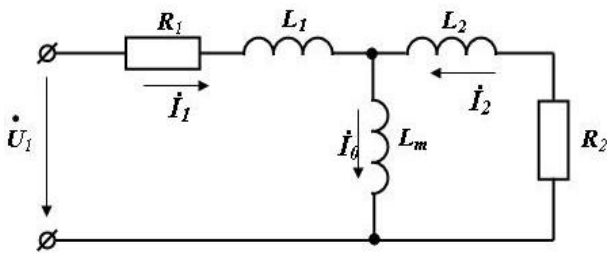


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

На рис. 1 имеются следующие обозначения: R_1 , R_2 – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора соответственно; L_m – главная индуктивность контура (индуктивность намагничивания контура), ($L_m = 1,5 L_{mf}$, L_{mf} – главная индуктивность фазы); $L_{1\sigma}$, $L_{2\sigma}$ – индуктивности рассеяния фазы статора и фазы ротора соответственно.

Все величины, относящиеся к ротору, приведены к обмотке статора (штрих в обозначениях опущен).

Основными экспериментальными данными, получаемыми при исследованиях, являются данные токов и напряжений статора. Прямая взаимосвязь между этими величинами в установившемся режиме выражается с помощью активной и реактивной составляющих входного сопротивления. Их величины и соотношение определяют

полное входное сопротивление и сдвиг по фазе между напряжением и током статора. Поэтому активная и реактивная составляющие входного сопротивления были приняты в качестве анализируемых выражений. Входные активная и реактивная составляющие входного сопротивления со стороны статора на основании схемы замещения (рис. 1) равны:

$$R_{BX} = R_1 + \frac{(\omega L_m)^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_{2\sigma})^2}; \quad (1)$$

$$X_{BX} = \omega L_{1\sigma} + \frac{\omega L_m \omega L_{2\sigma} (\omega L_m + \omega L_{2\sigma}) + \omega L_m R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_m + \omega L_{2\sigma})^2}. \quad (2)$$

Оценку устойчивости модели по отношению к погрешностям в исходных данных будем оценивать следующим образом:

- для предварительно заданного набора параметров схемы замещения определяем R_{BX} и X_{BX} ;
- в каждом из уравнений для R_{BX} и X_{BX} при различных частотах питания будем полагать известными все параметры, кроме одного, который будем определять при наличии погрешности в значениях R_{BX} и X_{BX} , задаваемую в пределах $\pm 5\%$. То есть для каждого варианта будем определять значение искомого параметра два раза – при наличии как положительного, так и отрицательного отклонения;
- полученные значения анализируемого параметра будем сравнивать с исходным (т.е. с тем, которое было использовано при вычислении R_{BX} и X_{BX});
- далее выбираем значение с максимальной величиной отклонения. По данному максимальному отклонению можно делать вывод о том, насколько данный параметр является чувствительным к наличию ошибок.

Математические эксперименты по приведенному выше алгоритму были выполнены в программе MathCad. Были получены данные, характеризующие чувствительность каждого из параметров схемы замещения на основании уравнений для R_{BX} и X_{BX} . В качестве примера ниже приводятся графики (рис. 2–5) зависимости точности определения R_2 из уравнения (1) для R_{BX} и $L_{\sigma} = L_{1\sigma} = L_{2\sigma}$ из уравнения (2) для X_{BX} в функции от частоты питания при неподвижном и вращающемся роторе. Индуктивности рассеяния статора и ротора были приняты равными. Основанием для этого послужила, с одной стороны, информация о типовых значениях параметров схемы замещения в относительных единицах [6], а с другой – тот факт, что Т-образная схема замещения теоретически не позволяет определить все пять ее параметров [7].

Из рис. 2 видно, что на точность определения R_2 при неподвижном роторе из выражения (1) существенно влияет частота входного напряжения. Причем это влияние по-разному проявляется для машин различной мощности. Значение частоты питания, при котором еще можно пренебречь эффектом вытеснения тока ротора, равно 5 Гц [8], следует применять для двигателей мощностью выше 1 кВт. Для двигателей мощностью 1 кВт и меньше частота питания при идентификации должна быть увеличена.

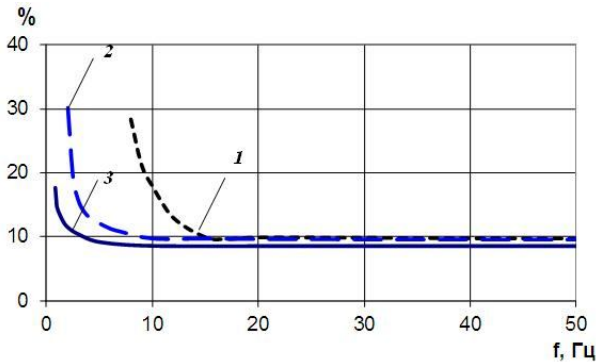


Рисунок 2 – Зависимости от частоты максимального отклонения при определении величины R_2 из уравнения (1) и наличии ошибки в R_{BX} в пределах $\pm 5\%$ (1 – для двигателей мощностью 0,01 кВт; 2 – 1 кВт; 3 – 100 кВт) при неподвижном роторе ($s = 1$)

При вращающемся роторе (рис. 3) точность определения R_2 / s из выражения (1) также зависит от частоты питания. Рекомендуемый диапазон частот питания в этом случае уже, чем при неподвижном роторе.

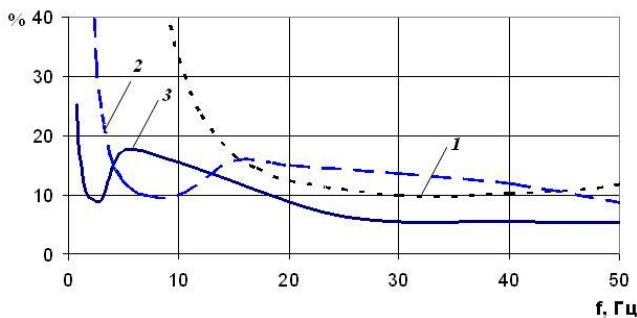


Рисунок 3 – Зависимости от частоты максимального отклонения при определении величины R_2 из уравнения (1) при наличии ошибки в R_{BX} в пределах $\pm 5\%$ (1 – для двигателей мощностью 0,01 кВт; 2 – 1 кВт; 3 – 100 кВт) при вращающемся роторе ($s = 0,05$)

По данным рис. 4 видно, что при определении L_σ при неподвижном роторе нужно руководствоваться теми же рекомендациями касательно частоты питания, что и для R_2 при $s = 1$.

Значения отклонений для параметров R_2 (R_2 / s), L_m , L_σ , определяемых из уравнений для R_{BX} и X_{BX} , сведены в табл. 1, 2. Здесь рассматривается как неподвижный, так и вращающийся ротор при $s = 0,05$. Допустимой величиной отклонения значения определяемого параметра от исходного его значения было принято 10 %.

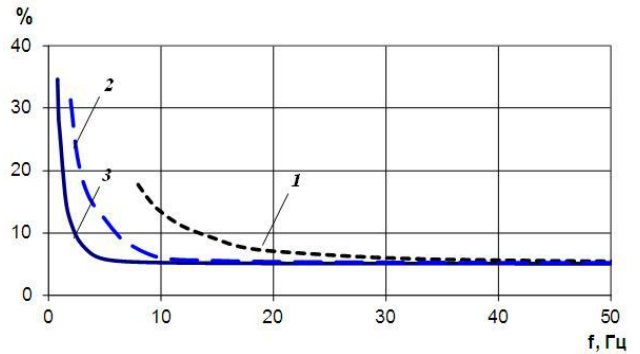


Рисунок 4 – Зависимости от частоты максимального отклонения при определении величины L_σ из уравнения (2) при наличии ошибки в X_{BX} в пределах $\pm 5\%$ (1 – для двигателей мощностью 0,01 кВт; 2 – 1 кВт; 3 – 100 кВт) при неподвижном роторе ($s = 1$)

При вращающемся роторе определение L_σ (рис. 5) из выражения (2) для машин мощностью до 100 кВт является затруднительным. Поэтому L_σ рекомендуется определять при неподвижном роторе.

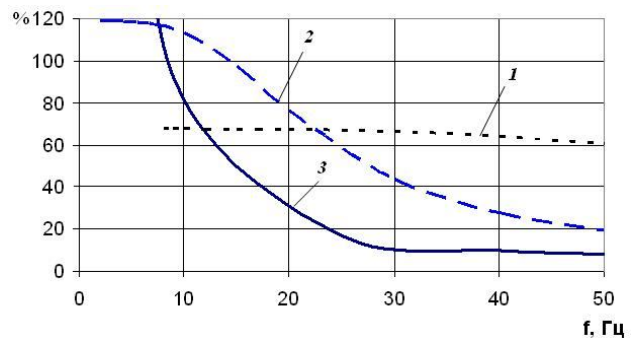


Рисунок 5 – График зависимости от частоты максимального отклонения при определении величины L_σ из уравнения (2) при наличии ошибки в X_{BX} в пределах $\pm 5\%$ (1 – для двигателей мощностью 0,01 кВт; 2 – 1 кВт; 3 – 100 кВт) при вращающемся роторе ($s = 0,05$)

Исходя из данных табл. 1, в дополнение к выводам, полученным из рис. 2–5, следует отметить:

1) использование X_{BX} для определения R_2 возможно только на частоте f_0 (f_0 – частота, при ко-

торой функция $X_{BX} - \omega(L_{1\sigma} + \frac{L_m L_{2\sigma}}{L_m + L_{2\sigma}})$ имеет максимум, равный $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$, где $\omega_0 = \frac{R_2}{L_m + L_{2\sigma}}$ [7].

По мере удаления частоты питания от значения f_0 точность стремительно уменьшается. Поэтому определение R_2 необходимо выполнять с помощью выражения для R_{BX} ;

2) определение L_σ возможно только с использованием выражения для X_{BX} ;

3) частоту напряжения питания для идентификации активного сопротивления ротора R_2 и усредненного значения индуктивности рассеивания L_σ удобно определять по выражению

$$f = 10 - 2,5 \lg P_H, \quad (3)$$

где P_H – номинальная мощность двигателя, кВт;

4) что касается L_m , то при неподвижном роторе с использованием переменного напряжения питания определение этого параметра нецелесообразно. Несмотря на то, что с использованием выражения (2) для X_{BX} можно получить значение L_m при частоте $f_0/2$, точность определения резко падает при незначительном отклонении от $f_0/2$. Для машин различных мощностей, как показывают расчеты для параметров схемы замещения в относительных единицах [6], f_0 составляет:

- 0,01 кВт $f_0 \approx 5$ Гц;
- 1 кВт $f_0 \approx 1 f_0$ Гц;
- 100 кВт $f_0 \approx 0,2$ Гц.

Таблица 1 – Рекомендуемые значения частот при определении параметров схемы замещения в зависимости от исходного уравнения при неподвижном роторе

Параметр схемы замещения	Используемое уравнение	Частота питания, Гц		
		Мощность двигателя		
		0,01 кВт	1 кВт	100 кВт
R_2 / s	R_{BX}	≥ 15	≥ 10	≥ 5
	X_{BX}	f_0	f_0	f_0
L_σ	R_{BX}	–	–	–
	X_{BX}	≥ 15	≥ 10	≥ 5
L_m	R_{BX}	–	–	–
	X_{BX}	$f_0/2$	$f_0/2$	$f_0/2$

Данные табл. 2 для вращающегося ротора отличаются от случая с неподвижным ротором, а именно:

1) для определения R_2/s можно помимо выражения (1) использовать выражение (2) для машин мощностью 1 кВт и выше;

2) определение L_σ возможно только из выраже-

ния (2) для машин мощностью 100 кВт и выше;

3) определение L_m возможно как с использованием выражения для R_{BX} , так и выражения для X_{BX} с учетом рекомендуемых интервалов частот питания, значения которых существенно зависят от мощности двигателя.

Таблица 2 – Рекомендуемые значения частот при определении параметров схемы замещения в зависимости от исходного уравнения при вращающемся роторе ($s = 0,05$)

Параметр схемы замещения	Используемое уравнение	Частота питания, Гц		
		Мощность двигателя		
		0,01 кВт	1 кВт	100 кВт
R_2 / s	R_{BX}	≥ 30	≥ 40	≥ 20
	X_{BX}	–	≥ 15	≥ 5
L_σ	R_{BX}	–	–	–
	X_{BX}	–	–	≥ 30
L_m	R_{BX}	≥ 12	3–40	1–12
	X_{BX}	$\leq f_H$	≤ 12	$\leq 4; 15–25$

ВЫВОДЫ. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии наличия погрешностей в исходных экспериментальных данных на точность результатов идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Игнорирование данного факта приводит к риску получения недостоверных результатов.

Для каждого в отдельности параметра схемы замещения была проведена серия математических экспериментов, на основании которых были сформулированы рекомендации по определению параметров схемы замещения как при неподвижном, так и при вращающемся роторе. Полученные рекомендуемые значения частот питания статора обеспечивают стабильность результатов идентификации параметров схемы замещения к наличию ошибок в исходных экспериментальных данных.

Так, для случая с неподвижным ротором:

1) при определении R_2 целесообразно использовать выражение для R_{BK} ;

2) при определении L_σ целесообразно использовать выражение для R_{BK} ;

3) частоту напряжения питания для идентификации активного сопротивления ротора R_2 и усредненного значения индуктивности рассеивания L_σ в составе других параметров схемы замещения АД при неподвижном роторе удобно определять по уравнению (3). При этом обеспечивается ошибка идентификации не более 10 % при наличии ошибки нахождения входного сопротивления со стороны статора не более 5 %. Чем меньше мощность двигателя, тем выше должна быть частота питания (следует отметить, что эффект вытеснения тока в цепи ротора машин малой мощности проявляется в меньшей степени, чем в машинах большой мощности [6, 8]);

4) при определении L_m целесообразно использовать экспериментальные данные опыта подачи постоянного напряжения на фазы статора (имеется в виду несимметричное питание фаз статора постоянным током).

В случае вращающегося ротора для определения R_2/s и L_σ стоит использовать те же выражения, что и при неподвижном роторе. Рекомендуемые значения частоты питания приведены в табл. 1, 2. Обратим внимание, что получение достоверных

результатов для параметра L_σ для двигателей мощностью до 100 кВт при вращающемся роторе является затруднительным, поэтому значение L_σ рекомендуется определять при неподвижном роторе.

Определение L_m рекомендовано производить с помощью выражения для X_{BK} . Рекомендуемые значения для частоты питания приведены в табл. 1, 2. Однако наиболее просто данный параметр находится из общеизвестного метода холостого хода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. – 2004. – Вып. 10. – С. 26–35.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006.
3. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: монография. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 470 с.
4. Michalik W. Parameter estimation methods at three-phase induction machines // Proceedings of the 11-th International Conference on Power Electronics and Application. – EPE 2005. – Germany: Dresden, 2005, CD-ROM.
5. Peixoto Z., Seixas P. Parameters Identification for Induction Machines at Standstill // Proceedings of the 8-th European Conference on Power Electronics and Application. – 1999, CD-ROM.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
7. Бешта А.С., Сёмин А.А. Особенности применения Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя для задач идентификации параметров // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 553–555.
8. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

ACCURACY ESTIMATION OF THE EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS IDENTIFICATION OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR

O. Beshta, A. Syomin

State Higher Educational Institution "National Mining University"

vul. D. Yavornitskogo, 19, Dnipro, 49027, Ukraine. E-mail: syomin_andrew@mail.ru

Purpose. To estimate the accuracy of T-shaped equivalent circuit parameters estimation of the squirrel cage induction motor taking into account errors in the initial experimental data. This will allow formulating the conditions of the experiment with acceptable sensitivity of the model to the errors. **Methodology.** The problem was solved using a series of computational experiments. The evaluation of the error effect was made as follows: the values of the input active and

reactive components of the input impedance on the stator side were changed by the error value (assumed to be $\pm 5\%$). Next, the determination of each parameter was made with other parameters assumed to be known. Based on the value of the maximum deviation of the parameter, a conclusion was made about its sensitivity to the error. **Results.** Recommendations were formulated for determination of the equivalent circuit parameters both for stationary and rotating rotor. The analytical expression was obtained with the help of which it is possible to determine the recommended frequency of the supply voltage when identifying the active rotor resistance and the average value of the leakage inductance for stationary rotor. **Originality.** For the first time the numerical estimates of the sensitivity of the equivalent circuit parameters to the errors in the initial experimental values were obtained. **Practical value.** The use of the recommended values of stator power frequencies ensures the stability of the results of the equivalent circuit parameters identification to the presence of errors in the initial experimental data, eliminating the risk of obtaining unreliable results. References 8, tables 2, figures 5.

Key words: induction motor, identification, equivalent circuit, parameter sensitivity, mathematical model.

REFERENCES

1. Danilov, A. (2004), "Modern industrial current sensors", *Sovremennaya elektronika*, Vol. 10, pp. 26–35. (in Russian)
2. Sokolovskiy, G.G. (2006), *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC electric drives with frequency control], Akademiya, Moscow. (in Russian)
3. Pivnyak, G.G. and Volkov, A.V. (2006), "Sovremennye chastotno-reguliruemie asinkhronnye elektroprivody s shirotno-impulsnoy modulyatsiyey: monografiya" [Modern variable frequency induction motor electric drive with pulse-width modulation, Monograph], Dnepropetrovsk. (in Russian)
4. Michalik, W. (2005), Parameter estimation methods at three-phase induction machines [*Proceedings of the 11-th International Conference on Power Electronics and Application*], Dresden, Germany.
5. Peixoto, Z. and Seixas, P. (1999), "Parameters Identification for Induction Machines at Standstill" [*Proceedings of the 8-th European Conference on Power Electronics and Application*], CD-ROM.
6. Ivanov-Smolenskiy, A.V. (1980), *Elektricheskie mashiny* [Electric machines], Energiya, Moscow. (in Russian)
7. Beshta, A.S. and Semin, A.A. (2012), "Special feature of using of T-shaped induction motor equivalent circuit for problems of parameters identification", *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy. Tematichniy vypusk "Problemy avtomatyzovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktyka"*, Vol. 3, no. 19, pp. 553–555. (in Russian)
8. Zherve, G.A. (1984), *Promishlennye ispitaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electric machines], Energoatomizdat, Leningrad. (in Russian)

Стаття надійшла 18.03.2017.