

УДК 621.313.333

А. Н. ПЕТРЕНКО, В. П. ШАЙДА, Н. Я. ПЕТРЕНКО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ РОТОРА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ АДАПТИРОВАННОЙ ДЛЯ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье подробно рассмотрена методика определения тепловых сопротивлений ротора частотно-управляемого асинхронного двигателя (ЧУАД), которые являются частью параметров его эквивалентной тепловой схемы. Математическая модель, полученная на основе предложенной эквивалентной тепловой схемы, использовалась для исследования теплового состояния ЧУАД. Результаты исследований подробно освещены в работах [1–6] и подтверждены экспериментально. Материал статьи дополняет эти работы и позволяет облегчить освоение и использование данной методики.

Ключевые слова: частотно-управляемый асинхронный двигатель, тепловое состояние двигателя, метод эквивалентных тепловых схем, тепловые сопротивления ротора

Введение. Наиболее широко в отраслях промышленности, коммунального и сельского хозяйства используются электроприводы на базе асинхронных электродвигателей (АД). Мировая тенденция экономии энергоресурсов требует замены нерегулируемых электроприводов регулируемыми [7]. Поэтому естественно, что привода на базе АД стремятся модифицировать путем их переделки в регулируемые – частотно-управляемые. Такая модификация электропривода позволяет не только экономить электроэнергию, но и уменьшить эксплуатационные затраты [8, 9].

Однако, несмотря на то, что такая модификация привода позволяет сохранить АД без изменений, он вносит некоторые изменения в процесс работы самого двигателя. В частности появляются дополнительные электрические и магнитные потери от высших гармоник тока и магнитного потока. Эти потери могут достигать 20 % от суммы основных потерь и во многом зависят от типа источника питания и используемого закона регулирования частоты вращения. Появление дополнительных потерь приводит к изменению структуры температурного поля АД и может привести к его выходу из строя.

При работе АД в продолжительном режиме (S1) для оценки его теплового состояния можно использовать хорошо известный метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС) [10]. Однако известные стандартные ЭТС не учитывают появление дополнительных потерь в АД при его работе в составе частотно-управляемого привода. Кроме того, часть электроприводов работает в других режимах, одним из наиболее распространенных режимов является повторно-кратковременный режим работы. Это тоже вносит свои особенности в распределение температуры в различных частях АД.

Задача адекватной оценки теплового состояния АД и его защиты от выхода из строя беспокоит многих ученых. Создание адекватной математической модели для оценки теплового состояния АД поможет не только определить допустимые режимы работы двигателя, но и использовать математическую модель в диагностической аппаратуре для определения ресурса системы изоляции. В последнее время опубликован целый ряд работ посвященных исследованию

теплового состояния частотно-управляемого АД [11-15]. Так в работе [11] определяется граница применимости метода средних температур для оценки теплового состояния АД в повторно-кратковременном режиме работы, в работе [12] также исследуется тепловое состояние АД, но при пониженной частоте вращения методом ЭТС. Вопрос создания математической модели тепловых процессов АД рассматривается в работах [13, 14], а в работе [15] исследуется нагрев АД с фазным ротором методом ЭТС и производится оценка ресурса системы изоляции.

Авторами статьи в работах [1–6] проводились исследования теплового состояния частотно-управляемого АД с использованием метода ЭТС. Однако из-за ограниченности возможностей некоторые вопросы методики расчета температурного поля остались неосвещенными. В работе [16] была рассмотрена методика определения тепловых сопротивлений статора адаптированной ЭТС АД. Данная статья завершает цикл посвященный определению параметров адаптированной ЭТС АД, в ней подробно рассматривается методика определения тепловых сопротивлений обмотки ротора частотно-управляемого АД.

Методика расчета тепловых сопротивлений ротора. Как уже было отмечено, при исследовании теплового состояния частотно-управляемого АД, которые проводились в работах [1-6], использовался метод ЭТС. В качестве базовой была принята ЭТС закрытого обдуваемого двигателя [10], которая была адаптирована к условиям работы частотно-управляемого АД. Адаптированная ЭТС АД, для стационарных режимов работы, представлена на рис. 1.

К источникам теплоты ЭТС исследуемого АД относятся основные и дополнительные электрические и магнитные потери, а также дополнительные потери от высших гармоник и магнитного потока. Рассмотрим источники теплоты в роторе, на ЭТС (см. рис. 1) они обозначены:

$P_{10} = P_{11} = 0,5P_{\text{вент}}$ – вентиляционные потери;

$P_{12} = P_{13} = 0,5P_{\text{подш}}$ – потери на трение в подшипниках;

P_{14} – суммарные потери в обмотке ротора и дополнительные потери в зубцах сердечника ротора;

P_{16} – дополнительные потери в спинке сердечника ротора.

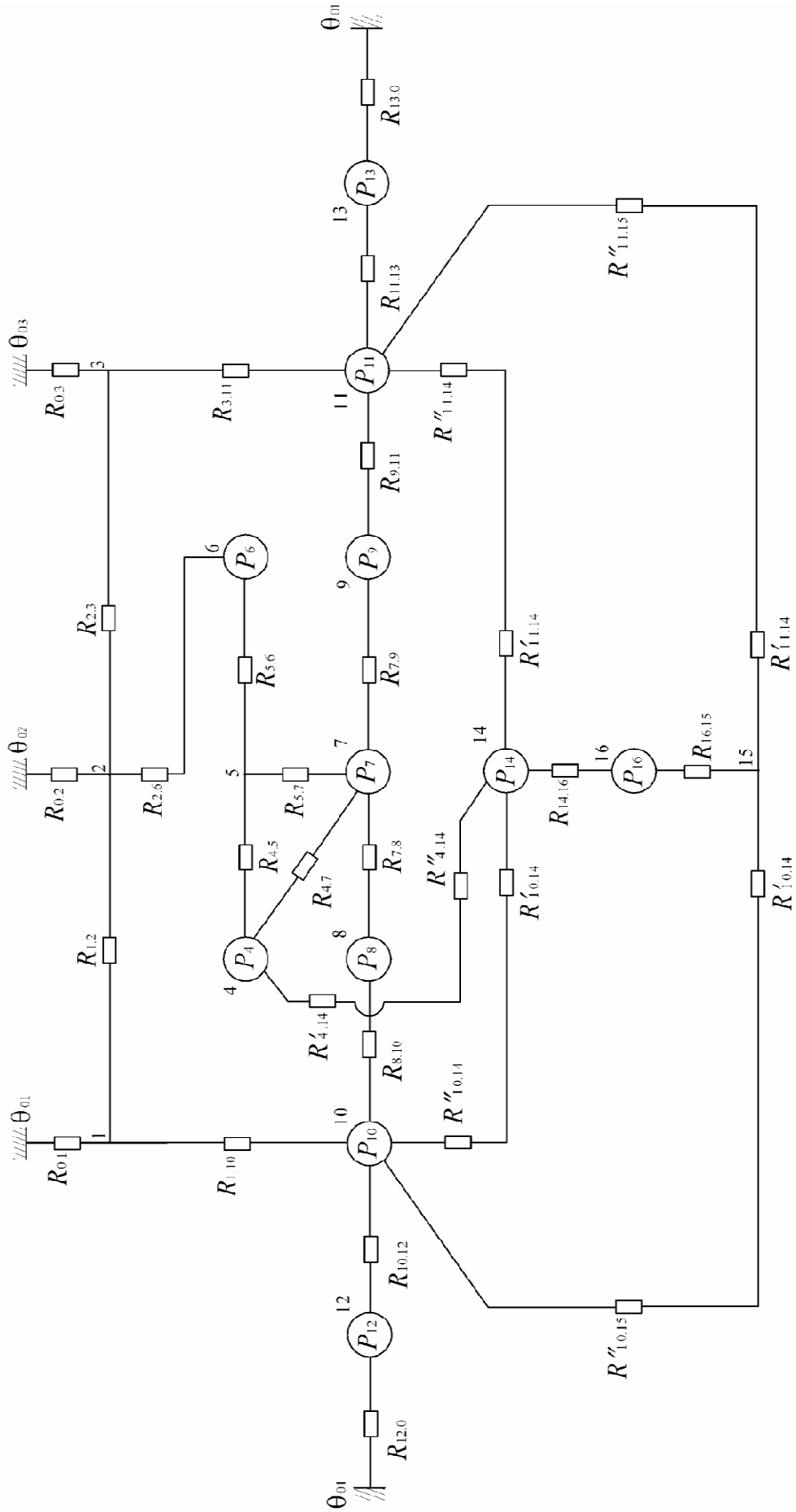


Рис. 1 ЭТС частотно-управляемого асинхронного двигателя для стационарных режимов работы

Рассмотрим порядок определения тепловых сопротивлений ротора.

1 Тепловое сопротивление между подшипниковыми щитами и внутренним воздухом (см. рис. 1), К/Вт

$$R_{10.12} = R_{11.13} = \frac{4}{\alpha_{щ.в} \cdot \pi \cdot (d_{se}^2 - d_B^2)},$$

где $\alpha_{щ.в}$ – коэффициент теплоотдачи от подшипниковых щитов к внутреннему воздуху;

d_B – диаметр шейки вала под подшипником.

Коэффициент теплоотдачи от подшипниковых щитов к внутреннему воздуху, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{щ.в} = \frac{10,24 \cdot \lambda_B \cdot Re^{0,48}}{\left(\frac{2 \cdot d_{se}}{d_{se} + d_s} \right)^{0,52}},$$

где λ_B – коэффициент теплопроводности воздуха, при 25°C $\lambda_B = 0,027$ Вт/(м·К);

Re – критерий Рейнольдса.

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{U_p \cdot (d_{se} + d_s)}{4 \cdot \nu_B},$$

где U_p – окружная скорость ротора;

ν_B – кинематическая вязкость воздуха, при

25°C $\nu_B = 15,54 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

d_{se} и d_s – наружный диаметр статора и диаметр расточки статора.

2 Тепловое сопротивление между внутренним воздухом и «свисающими» частями корпуса, К/Вт

$$R_{1.10} = R_{3.11} = \frac{1}{\alpha_{св} \cdot l_{св} \cdot \pi \cdot d_{se}},$$

где $\alpha_{св}$ – коэффициент теплоотдачи от подшипниковых щитов к «свисающей» части корпуса.

Коэффициент теплоотдачи от подшипниковых щитов к «свисающей» части корпуса

$$\alpha_{св} = \frac{11,64 \cdot \lambda_B \cdot Re^{0,395}}{d_{se}}.$$

$$\text{Критерий Рейнольдса } Re = \frac{U_p \cdot d_{se}}{2\nu_B}.$$

3 Тепловое сопротивление между подшипниковыми щитами и наружным воздухом, К/Вт:

1) со стороны вентилятора

$$R_{12.0} = \frac{4}{\alpha_{щ.н.в} \cdot \pi \cdot (d_k^2 - d_B^2)},$$

где d_k – диаметр корпуса со стороны ребра;

$\alpha_{щ.н.в}$ – коэффициент теплоотдачи со стороны вентилятора.

Коэффициент теплоотдачи со стороны вентилятора, Вт/м²

$$\alpha_{щ.н.в} = 20 + 9,4 \cdot U_B^2.$$

2) со стороны привода

$$R_{13.0} = 2 \cdot R_{12.0},$$

т.к. коэффициент теплоотдачи со стороны привода

$$\alpha_{щ.н.п} = 0,5 \cdot \alpha_{щ.н.в}.$$

4 Тепловое сопротивление обмотки ротора от пазовой части к короткозамкнутым кольцам, К/Вт:

$$R'_{10.14} = R'_{11.14} = \frac{l_r + l_{fr}}{6 \cdot \lambda_{Al} \cdot S_{Al}},$$

где l_{fr} – ширина короткозамкнутого кольца, м;

λ_{Al} – коэффициент теплоотдачи ротора,

$\lambda_{Al} = 150$ Вт/(м·К);

S_{Al} – поперечное сечение всех стержней обмотки ротора.

Поперечное сечение всех стержней обмотки ротора, м²

$$S_{Al} = Q_r \cdot S_{rc},$$

где Q_r – количество стержней обмотки ротора;

S_{rc} – сечение одного стержня.

5 Тепловое сопротивление между лобовыми частями обмотки ротора и лопатками и внутренним воздухом, К/Вт

$$R''_{10.14} = R''_{11.14} = \frac{1}{\alpha_{fn} \cdot [2b_{fn} \cdot h_{fn} \cdot N_{fn} \cdot \eta_{fn} + \pi \cdot (d_r - h_k) \cdot (2l_{fr} + h_k)]},$$

где α_{fn} – коэффициент теплоотдачи лопаток ротора;

b_{fn} , h_{fn} , N_{fn} – ширина, высота и количество лопаток на одном торце ротора;

η_{fn} – коэффициент качества лопатки ротора, выбирается в диапазоне от 0,93 до 0,96;

l_{fr} , h_k – ширина и высота короткозамыкающего кольца.

Коэффициент теплоотдачи лопаток ротора, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{fn} = 0,456 \cdot \frac{\lambda_B \cdot Re^{0,6}}{h_{fn}},$$

где h_{fn} – высота лопаток ротора.

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{U_{fn} \cdot l_{fr}}{\nu_B},$$

где U_{fn} – средняя скорость потока воздуха на выходе из роторных лопаток.

Средняя скорость потока воздуха на выходе из роторных лопаток, м/с

$$U_{fn} = 0,022 \cdot n_N \cdot d_{fn},$$

где n_N – номинальная частота вращения ротора;

d_{fn} – средний диаметр лопаток ротора.

6 Тепловое сопротивление спинки сердечника

ротора и технологического зазора с валом:

1) если форма напряжения на двигателе синусоидальная, $P_{\text{магв}}=0$, т.е. тепловое сопротивление спинки есть сопротивление цилиндрической стенки без потерь, К/Вт

$$R_{16.15} = \frac{\ln \left[\frac{d_c + 2h_{yr}}{d_c} \right]}{2\pi \cdot \lambda_{Fe} \cdot l_r \cdot K_{Fe}} + \frac{\Delta_{\text{усл}}}{\lambda_b \cdot \pi \cdot d_c \cdot l_r},$$

где d_c – диаметр отверстия под вал в сердечнике ротора, м;

h_{yr} – высота спинки сердечника ротора, м;

λ_{Fe} – коэффициент теплопроводности технической стали вдоль листов, $\lambda_{Fe} = 34$ Вт/(м·К);

$\Delta_{\text{усл}}$ – условный технологический зазор, определяемый в зависимости от диаметра вала, м;

K_{Fe} – коэффициент заполнения пакета сталью, находится в диапазоне от 0,96 до 0,97;

λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, при 100°C $\lambda_b = 3,21 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К).

2) если форма напряжения на двигателе ступенчатая, $P_{\text{магв}} \neq 0$, таким образом, тепловое сопротивление спинки есть сопротивление цилиндрической стенки с потерями, К/Вт

$$R_{16.15} = \frac{\ln \left[\frac{d_c + 2h_{yr}}{d_c} \right]}{6\pi \cdot \lambda_{Fe} \cdot l_r \cdot K_{Fe}} + \frac{\Delta_{\text{усл}}}{\lambda_b \cdot \pi \cdot d_c \cdot l_r}.$$

7 Тепловое сопротивление "сквозного" теплового потока в спинке ротора в зависимости от формы напряжения, К/Вт

$$R_{14.16} = R_{16.15}.$$

8 Тепловое сопротивление вала, К/Вт

$$R_{10.15}^i = R_{11.15}^i = \frac{l_r}{2 \cdot S_b \cdot \lambda_{\text{ст}}},$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности конструкционной стали марки 45, $\lambda_{\text{ст}} = 47$ Вт/(м·К);

S_b – площадь поперечного сечения вала, м².

9 Тепловое сопротивление от свободной поверхности вала к внутреннему воздуху, К/Вт

$$R_{10.15}^n = R_{11.15}^n = \frac{1}{\lambda_{\text{вал}} \cdot \pi \cdot d_o \cdot l_o},$$

где $\lambda_{\text{вал}}$ – коэффициент теплоотдачи вала;

d_o и l_o – наружный диаметр и длина свободного участка вала на одну сторону, м.

Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{вал}} = 0,095 \cdot \frac{\lambda_b}{d_o} \cdot (0,5 \cdot \text{Re}^2)^{0,35}.$$

Критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{U_b \cdot d_c}{\nu_b}.$$

где U_b – окружная скорость вала.

Окружная скорость вала, м/с

$$U_b = \frac{\pi \cdot d_c \cdot n_N}{60}.$$

Выводы. Рассмотрена методика определения тепловых сопротивлений ротора ЭТС адаптированной для частотно-управляемого АД. Данная методика в сочетании с методикой, приведенной в работе [16], позволяет определить совокупность параметров разработанной ЭТС и составить математическую модель теплового состояния частотно-управляемого АД.

Разработанная математическая модель теплового состояния частотно-управляемого АД была проверена экспериментально на АД мощностью 2,5 кВт и 15 кВт, результаты экспериментов приведены в работе [5].

Список литературы: 1. Остаевский, Н.А. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования и типах преобразователей / Н.А. Остаевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 3. – С. 37–41. 2. Остаевский, Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах / Н.А. Остаевский, А.Н. Петренко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Тематич. вып. науч.-техн. журнала «Электронформ». – 2009. – С. 266–270. 3. Остаевский, Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования / Н.А. Остаевский, А.Н. Петренко // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов». – 2010. – № 16. – С. 89–102. 4. Остаевский, Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки / Н.А. Остаевский, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 3. – С. 25–29. 5. Петренко А.Н. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 21–23. 6. Петренко А.Н. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при пуске / А.Н. Петренко, В.П. Шайда, Н.Я. Петренко // Электротехника (Россия). – 2014. – № 2. – С. 20–23. 7. Регулируемый электропривод [Электронный ресурс]: Экономические и технологические аспекты энергоресурсосбережения за счет широкомасштабного внедрения регулируемого электропривода / Сайт компании УП «ПРОМЭНЕРГЕТИКА». – Режим доступа: http://pe.by/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=31. 8. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений / В.С. Петрушин. – О.: Наука и техника, 2006. – 320 с. 9. Сандлер А.С. Частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сорбатов. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 144 с. 10. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с. 11. Зюев А.М. Учет колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя при проверке по нагреванию в повторно-кратковременном режиме / А.М. Зюев, В.П. Метельков // Известия Томского политехнического университета. – 2015. Т. 326. – № 4. – С. 146–153. 12. Коцур М.И. Тепловое состояние асинхронного двигателя при пониженной частоте вращения ротора / М.И. Коцур // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 2/3 (62). – С. 8–10. 13. Зализный Д.И. Адаптивная математическая модель тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Д.И. Зализный, О.Г. Широков, В.В. Попичев // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2015. Т. 1. – № 1 (60). – С. 1–13. 14. Анучин А. С. Использование двухмассовой тепловой модели для выбора асинхронного двигателя / А.С. Анучин, К.Г. Федорова // Вестник ИГЭУ. – 2013. Вып.3. – С. 1–3. 15. Коцур М.И. Оценка ресурса системы изоляции управляемого асинхронного двигателя с фазным ротором впад синхронном диапазоне частоты вращения / М.И. Коцур // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/8 (53). – С. 41–46. 16. Петренко А.Н.

Методика расчета тепловых сопротивлений статора частотно-управляемого асинхронного двигателя / А.Н. Петренко, В.П. Шайда, Н.Я. Петренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Електричні машини та електромеханічні перетворення енергії». – 2014. – № 38 (1081). – С. 122–131.

Bibliography (transliterated): 1. Ostashevskij, N.A., V.N. Ivanenko and A.N. Petrenko. "Poteri chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri razlichnyh zakonah regulirovanija i tipah preobrazovatelej." *Elektrotehnika i elektromehaniika* No. 3. (2009): 37–41. Print. 2. Ostashevskij, N.A., and A.N. Petrenko "Matematicheskaja model' teplovogo sostojanija chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja v stacionarnykh rezhimakh." *Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teorija i praktika. Tematich. vyp. nauch-tehn. Zhurnala Elektroinform.* 2009. 266–270. Print. 3. Ostashevskij, N. A., and A.N. Petrenko "Issledovanie teplovogo sostojanija chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri razlichnykh zakonah regulirovanija." *Vestnik NTU HPI. Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskij vypusk: Problemy sovershenstvovanija elektricheskikh mashin i apparatov.* No. 16. 2010. 89–102. Print. 4. Ostashevskij, N. A., and A.N. Petrenko. "Issledovanie teplovogo sostojanija chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri izmenenii nagruzki." *Elektrotehnika i elektromehaniika* No. 3. (2010): 25–29. Print. 5. Petrenko, A.N. "Eksperimental'noe issledovanie nagreva chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri razlichnykh istochnikah pitaniija." *Elektrotehnika i elektromehaniika* No. 5. 2010. 21–23. Print. 6. Petrenko, A.N., V.P. Shajda and N.Ja. Petrenko "Issledovanie teplovogo sostojanija chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri puske." *Elektrika* No. 2. 2014. 20–23. Print. 7. Reguliruemij elektroprivod: Ekonomicheskie I tehnozhicheskie aspekty energoresursoberezenija za schet shirokomasshtabnogo vnedrenija reguliruемого elektroprivoda. *Sajt kompanii UP "PROMJeNERGETIKA",* [Web]. 20 August 2014

<http://pe.by/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=31>. 8. Petrushin, V.S. *Asinhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode: ucheb. posob. dljastud. vyssh. ucheb. zavedenij.* Odessa: Naukajtehnika, 2006. Print. 9. Sandler, A.S., and R.S. Sorbatov *Chastotnoe upravlenie asinhronnymi dvigateljami.* Moscow. Leningrad: Energija, 1966. Print. 10. Borisenko, A.I., V.G. Dan'ko and A.I. Jakovlev *Ajerodinamika I teploperedacha v elektricheskikh mashinah.* Moscow: Energija, 1974. Print. 11. Ziuzev, A.M., and V.P. Metel'kov. "Uchet kolebanii temperatury obmotki statora asinhronnogo dvigatelja pri proverke po nagrevaniiu v povtorno-kratkovremennom rezhime." *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.* Vol. 326. No. 4. 146–153. Print. 12. Kotsur, M. I. "Teplovoe sostoianie asinhronnogo dvigatelja pri ponizhennoi chastote vrashcheniia rotora." *Vostochno-Evropetskii zhurnal peredovykh tekhnologii* 2.3.62.(2013): 8–10. Print. 13. Zaliznyi, D.I., O.G. Shirokov and V.V. Popichev. "Adaptivnaia matematicheskaja model' teplovykh protsessov asinhronnogo dvigatelja s korotkozamknutym rotorom." *Vestnik Gomeľ'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* Vol. 1. No. 1. 60. 2015. 1–13. 14. Anuchin, A.S. and K.G. Fedorova "Ispol'zovanie dvukhmassovoi teplovoi modeli dlja vybora asinhronnogo dvigatelja." *Vestnik IGEU.* No. 1. 2013. Print. 15. Kotsur, M. I. "Otsenka resursa sistemy izoliatsii upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja s faznym rotorom v podsinhronnom diapazone chastoty vrashcheniia." *Vostochno-Evropetskii zhurnal peredovykh tekhnologii.* No. 5.8.53.2011. 41–46. 16. Petrenko, A.N., V.P. Shajda and N.Ya. Petrenko. "Metodika rascheta teplovykh soprotivlenii statora chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja." *Visnik NTU KhPI. Ser.: Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorennia energii* 38. 1081. 2014. 122–131. Print.

Поступила (received) 10.10.2015



Петренко Александр Николаевич – кандидат технических наук, Харьковский Национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, старший преподаватель кафедры электрического транспорта; тел.: (095) 688-27-16; e-mail: petersanya2007@mail.ru.

Petrenko Alexander Nikolayevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), O.M. Beketov National University of Urban Economy, Senior Lecturer at the Department of Electrical transport, tel.: (095) 688-27-16; e-mail: petersanya2007@mail.ru.



Шайда Виктор Петрович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры электрических машин; тел.: (057) 707-68-44; e-mail: viktorshayda08@rambler.ru.

Shajda Viktor Petrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of electrical machines, tel.: (057) 707-68-44; e-mail: viktorshayda08@rambler.ru.



Петренко Николай Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры электрических машин; тел.: (050) 707-68-44.

Petrenko Nicolay Yakovlevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of electrical machines, tel.: (057) 707-68-44.