

А. Н. ПЕТРЕНКО, канд. техн. наук, ст. преп. ХНУГХ им. А.Н. Бекетова;
В. П. ШАЙДА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
Н. Я. ПЕТРЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ СТАТОРА ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье приводится методика определения тепловых сопротивлений статора частотно-управляемого асинхронного двигателя, которые необходимы для составления математической модели его теплового состояния. Материал статьи дополняет ранее опубликованные исследования [1– 6] и подробно раскрывает вопрос определения параметров эквивалентной тепловой схемы частотно-управляемого асинхронного двигателя.

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

Введение.

Разработка и внедрение регулируемого электропривода является одним из самых перспективных и экономически оправданных направлений из всех энергосберегающих технологий. Замена нерегулируемого электропривода регулируемым позволяет получить до (30 – 50) % экономии электроэнергии, поэтому в промышленно развитых странах доля выпуска регулируемых электроприводов составляет (80 – 90) % [7].

Наиболее широко в отраслях промышленности и коммунального хозяйства используются электроприводы на базе асинхронных электродвигателей (АД), они потребляют (55 – 60) % от всей энергии, потребляемой электроприводами [7]. Поэтому, перевод электроприводов на базе АД из нерегулируемых в регулируемые является важной задачей. Тем более, что при этом можно сохранить АД без изменений. Кроме экономии электроэнергии внедрение регулируемого электропривода позволяет уменьшить эксплуатационные затраты: увеличить ресурс работы оборудования за счет плавного регулирования частоты вращения, снизить величины пусковых токов и механических ударных нагрузок [8, 9].

Особенностью работы АД в составе частотно-управляемого привода является наличие дополнительных электрических и магнитных потерь от высших гармоник тока и магнитного потока. Эти потери зависят от типа источника питания, используемого закона регулирования и могут достигать 20 % от основных потерь. Присутствие дополнительных потерь приводит к изменению структуры температурного поля АД и может привести к его выходу из строя.

В работах [1 – 6] авторами статьи проводились исследования теплового состояния частотно-управляемого АД. Однако из-за ограниченности возможностей некоторые вопросы методики расчета температурного поля

остались неосвещёнными. Поэтому в данной статье приводится методика определения тепловых сопротивлений обмотки статора частотно-управляемого АД, которые необходимы для составления математической модели его теплового состояния.

Методика расчета тепловых сопротивлений статора

При исследовании теплового состояния частотно-управляемого АД, которые проводились в работах [1 – 6], использовался метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС). В качестве базовой была принята ЭТС закрытого обдуваемого двигателя, которая была адаптирована к условиям работы частотно-управляемого АД. Адаптированная ЭТС АД, для стационарных режимов работы, представлена на рис. 1.

К источникам теплоты ЭТС рассматриваемого АД относятся: основные электрические и магнитные потери, механические потери, обычные дополнительные потери и дополнительные потери, связанные с высшими гармониками тока и магнитного потока. На ЭТС (см. рис. 1) они обозначены:

P_4, P_6 – суммарные магнитные потери в зубцах и спинке сердечника статора;

$P_7, P_8 = P_9$ – суммарные электрические потери в пазовой и лобовых частях обмотки статора;

$P_{10} = P_{11} = 0,5P_{\text{вент}}$ – 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.

Для расчета тепловых сопротивлений внешней теплоотдачи обдуваемого оребренного корпуса R_{01}, R_{02}, R_{03} необходимо предварительно определить:

1) гидравлический диаметр межреберного канала, м

$$d_r = \frac{4h_p \cdot (t_p - \delta_p)}{2h_p + t_p - \delta_p},$$

где h_p – высота ребра, м; t_p – шаг оребрения, м; δ_p – средняя толщина ребра, м;

2) площадь межреберных каналов, м²

$$S_k = h_p \cdot (t_p - \delta_p) \cdot Z_k,$$

где Z_k – число межреберных каналов;

3) расход воздуха, м³/с

$$Q = 0,009 \cdot n_b \cdot D_b^3 \cdot e^{-0,02Z_k} \cdot t_p \cdot h_p \cdot \left(\frac{14,25 \cdot h_p^2 \cdot Z_k}{(Z_k - 1) \cdot t_p \cdot D_k} \right),$$

где n_b – частота вращения вентилятора, об/мин; D_b – наружный диаметр вентилятора, м; D_k – диаметр корпуса по дну каналов, м.

4) входная скорость воздуха, м/с

$$W_{\text{вх}} = \frac{Q}{S_{\text{к}}};$$

5) окружная скорость вентилятора, м/с

$$U_{\text{в}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{в}} \cdot n_{\text{в}}}{60};$$

6) эффективная скорость воздуха, м/с

$$W_{\text{эф}} = \sqrt{W_{\text{вх}}^2 + (0,5 \cdot U_{\text{в}})^2};$$

7) критерий Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{эф}} = \frac{W_{\text{эф}} \cdot d_{\text{г}}}{\nu_{\text{в}}},$$

где $\nu_{\text{в}} = 15,54 \cdot 10^{-6}$, м²/с – кинематическая вязкость воздуха при 25°C.

8) средний, для всей длины оребренного корпуса, коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К

$$\alpha_{\text{ср}} = 0,203 \cdot \frac{\lambda_{\text{в}}}{d_{\text{г}}} \cdot \text{Re}_{\text{эф}}^{0,66} \cdot \left(\frac{d_{\text{г}}}{l_{\text{п}}} \right)^{0,08},$$

где $\lambda_{\text{в}} = 0,027$ Вт/м·К – коэффициент теплопроводности воздуха при 25°C; $l_{\text{п}}$ – длина ребер, м.

9) параметр K

$$K = h_{\text{п}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{Al}} \cdot \delta_{\text{ос}}}},$$

где $\lambda_{\text{Al}} = 150$ Вт/м·К – коэффициент теплопроводности корпуса и ребер (алюминиевый сплав) [10]; $\delta_{\text{ос}}$ – толщина ребер у основания, м.

После расчета предварительных величин, необходимых для расчета, переходим к расчету тепловых сопротивлений:

1) тепловое сопротивление внешней теплоотдачи по длине «свисающей» части корпуса (сторона вентилятора), К/Вт

$$R_{01} = \frac{1}{1,7 \cdot \alpha_{\text{ср}} \cdot l_{\text{св}} \cdot (\pi \cdot D_{\text{к}} - Z_{\text{к}} \cdot \delta_{\text{п}} + 2h_{\text{п}} \cdot Z_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{п}})},$$

где $l_{\text{св}}$ – длина «свисающей» части корпуса, м; $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент качества ребра, определяется по кривой $\eta_{\text{п}} = f(K)$ [10].

2) тепловое сопротивление внешней теплоотдачи по длине части корпуса примыкающей к сердечнику статора, К/Вт

$$R_{02} = \frac{1}{1,0 \cdot \alpha_{\text{ср}} \cdot l \cdot (\pi \cdot D_{\text{к}} - Z_{\text{к}} \cdot \delta_{\text{п}} + 2h_{\text{п}} \cdot Z_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{п}})},$$

где l – длина сердечника статора, м.

3) тепловое сопротивление внешней теплоотдачи по длине «свисающей» части корпуса (сторона привода), К/Вт

$$R_{03} = \frac{1}{0,9 \cdot \alpha_{cp} \cdot l_{cv} \cdot (\pi \cdot D_k - Z_k \cdot \delta_p + 2h_p \cdot Z_k \cdot \eta_p)},$$

4) тепловое сопротивление корпуса, К/Вт

$$R_{1.2} = R_{2.3} = \frac{l_k}{\lambda_{Al} \cdot \pi \cdot (D_k^2 - D_a^2)},$$

где l_k – длина корпуса, м; D_a – наружный диаметр сердечника статора, м.

5) тепловое сопротивление между спинкой сердечника статора и корпусом, К/Вт

$$R_{2.6} = R'_{2.6} + R''_{2.6},$$

где $R'_{2.6}$ – тепловое сопротивление условного технологического зазора $\delta_{yсл}$ между корпусом и сердечником статора, К/Вт; $R''_{2.6}$ – тепловое сопротивление спинки сердечника статора, К/Вт.

Подставляя составляющие получим

$$R_{2.6} = \frac{\delta_{yсл}}{\lambda_b \cdot \pi \cdot D_a \cdot l} + \frac{\ln\left(\frac{D_a}{D + 2h_z}\right)}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{Fe} \cdot l \cdot K_{ш}},$$

где D – внутренний диаметр сердечника статора, м; h_z – высота зубцов сердечника статора, м; λ_{Fe} – коэффициент теплоотдачи электротехнической стали 2013 (вдоль листов), $\lambda_{Fe} = 34$ Вт/(м·К); $K_{ш}$ – коэффициент заполнения пакета сердечника сталью; $\delta_{yсл}$ – определяется по кривой $\delta_{yсл} = f(D_a)$.

б) тепловое сопротивление зубцовой зоны сердечника статора, К/Вт

$$R_{4.5} = \frac{h_z}{3 \cdot \lambda_{Fe} \cdot b_z \cdot l \cdot Z_1 \cdot K_{ш}},$$

где b_z – средняя ширина зубца, м; Z_1 – число зубцов сердечника статора.

7) тепловое сопротивление учета «сквозного потока» в спинке сердечника статора, К/Вт

$$R_{5.6} = 2 \cdot R''_{2.6}.$$

8) тепловое сопротивление между пазовой частью обмотки статора и зубцами, К/Вт

$$R_{4.7} = R'_{4.7} + R''_{4.7},$$

где $R'_{4.7}$ – внутреннее тепловое сопротивление обмотки статора поперек пазов; $R''_{4.7}$ – тепловое сопротивление пазовой изоляции (боковые стенки паза) с учетом воздушных прослоек.

Подставляя составляющие получим:

$$R_{4,7} = \frac{b_{\text{пэф}}}{12 \cdot \lambda_{\text{экв}} \cdot h_{\text{пэф}} \cdot l \cdot Z_1} + \frac{\beta_{\text{инп}} / \lambda_{\text{инп}}}{2 \cdot h_{\text{пэф}} \cdot l \cdot Z_1},$$

где $b_{\text{пэф}}$, $h_{\text{пэф}}$ – ширина (средняя) и высота паза, занятые обмоткой, м; $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки, определяемый по [10], $\lambda_{\text{экв}} = 0,38$ Вт/(м·К); $\beta_{\text{инп}}$ – толщина пазовой изоляции, м; $\lambda_{\text{инп}}$ – коэффициент теплопроводности пазовой изоляции с учетом воздушных прослоек, $\lambda_{\text{инп}} = 0,16$ Вт/(м·К).

9) тепловое сопротивление между пазовой частью обмотки статора и спинкой сердечника статора (через «дно» пазов), К/Вт

$$R_{5,7} = R'_{5,7} + R''_{5,7},$$

где $R'_{5,7}$ – внутреннее тепловое сопротивление обмотки статора вдоль пазов; $R''_{5,7}$ – тепловое сопротивление пазовой изоляции («дно» пазов) с учетом воздушных прослоек.

В результате получаем формулу

$$R_{5,7} = \frac{h_{\text{пэф}}}{3 \cdot \lambda_{\text{экв}} \cdot b_{\text{пэф}} \cdot l \cdot Z_1} + \frac{\beta_{\text{инп}} / \lambda_{\text{инп}}}{b_{\text{пэф}} \cdot l \cdot Z_1}.$$

10) тепловое сопротивление воздушного зазора с учетом «сквозного» потока в зубцовой зоне статора, К/Вт

$$R_{4,14} = R'_{4,14} + R''_{4,14},$$

где $R'_{4,14}$ – тепловое сопротивление учета «сквозного» потока в зубцовой зоне сердечника статора; $R''_{4,14}$ – тепловое сопротивление воздушного зазора.

Составляющие сопротивления определяются по формулам

$$R'_{4,14} = 2 \cdot R_{4,5};$$

$$R''_{4,14} = \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot \pi \cdot D_p \cdot l},$$

где α_{δ} – коэффициент теплоотдачи в воздушном зазоре, определяемый через критерий Рейнольдса и Нуссельта.

Критерий Рейнольдса определяется по формуле

$$\text{Re} = \frac{U_p \cdot \delta}{v_b},$$

где U_p – окружная скорость ротора, см/с; δ – воздушный зазор, см; $v_b = 0,211$ см²/с при средней температуре внутреннего воздуха 78°C.

Окружная скорость ротора

$$U_p = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n_2}{60}.$$

Критерий Нуссельта

$$Nu = 0,23 \cdot \beta \cdot \left(\frac{2 \cdot \delta}{D_p} \right)^{0,25} \cdot Re^{0,5}.$$

Тогда коэффициент теплоотдачи в воздушном зазоре, Вт/(см²·К)

$$\alpha_{\delta} = \frac{Nu \cdot \lambda_b}{\delta},$$

где $\lambda_b = 3,05 \cdot 10^{-4}$ Вт/(см·К) при средней температуре внутреннего воздуха 78°C; $\beta = f(2p)$, при $2p = 4\beta = 1,15$.

При расчете Re, Nu, α_{δ} используется несистемная единица длины – сантиметр (см).

11) тепловое сопротивление между лобовой и пазовой частями обмотки статора, К/Вт

$$R_{7,8} = R_{7,9} = \frac{l + l_{\text{лоб}}}{6 \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}},$$

где $l_{\text{лоб}}$ – длина одной лобовой части обмотки статора, м; λ_{Cu} – коэффициент теплопроводности меди, $\lambda_{Cu} = 390$ Вт/м·К.

Площадь поперечного сечения проводников обмотки статора, м²

$$S_{Cu} = \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot Z_1 \cdot n_p,$$

где d_m – диаметр проводника обмотки статора без изоляции, м; n_p – число проводников в пазу.

12) тепловое сопротивление между лобовыми частями обмотки статора и внутренним воздухом $R_{8,10} = R_{9,11}$, эти сопротивления рассматриваются как параллельно включенные сопротивления внешнего (обращенного к корпусу) и внутреннего слоев лобовых частей, К/Вт:

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

$$W_{\text{лоп}} = 0,022 \cdot n_p \cdot D_{\text{лоп}};$$

- критерий Рейнольдса $Re = \frac{W_{\text{лоп}} \cdot D}{\nu_b}$;

Коэффициенты теплоотдачи лобовых частей:

– внешняя поверхность (обращенная к корпусу), Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{л.внш}} = \frac{3,99 \cdot \frac{\lambda_b}{D} \cdot Re^{0,43}}{\ln \frac{1,3 \cdot D}{D_a - D}};$$

– внутренняя поверхность (обращенная к ротору), Вт/м²·К

$$\alpha_{\text{л.вт}} = \frac{Nu_{\text{вт}} \cdot \lambda_b}{D}.$$

$$\text{Критерий Нуссельта определяется по формуле: } Nu_{\text{вт}} = \frac{2,149 \cdot Re^{0,58}}{\ln \frac{D}{3,25 \cdot h_{\text{пэф}}}}.$$

Тепловое сопротивление от внешней поверхности вылета лобовых частей к внутреннему воздуху (параллельно включенные сопротивления продуваемого $R'_{\text{л.вн}}$ и непродуваемого $R''_{\text{л.вн}}$ участков), К/Вт

$$R'_{\text{л.вн}} = \frac{0,104 \cdot b_{\text{п}} \cdot h_{\text{пэф}}}{\lambda_{\text{эkv}} \cdot l_{\text{л.в.пр.}} \cdot (b_{\text{п}}^2 + 0,25 \cdot h_{\text{пэф}}^2) \cdot Z_1} + \frac{0,75}{\frac{\lambda_{\text{л.вн}}}{l_{\text{л.в.пр.}} \cdot Z_1 \cdot (b_{\text{п}} + 0,5 \cdot h_{\text{пэф}})}},$$

где $l_{\text{л.в.пр.}}$ – длина продуваемой части вылета лобовой части обмотки статора, $l_{\text{л.в.пр.}} = 0,031$ м.

Тепловое сопротивление непродуваемого участка

$$R''_{\text{л.вн}} = \frac{\frac{h_{\text{пэф}}}{3 \cdot \lambda_{\text{эkv}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{л.вн}}}}{\pi \cdot D_{\text{л.вн}} \cdot (l_{\text{л.в}} - l_{\text{л.в.пр}})}.$$

Тепловое сопротивление от внутренней поверхности вылета лобовых частей к внутреннему воздуху (параллельно включенные сопротивления $R'_{\text{л.вт}}$ и непродуваемого $R''_{\text{л.вт}}$ участков), К/Вт

$$R'_{\text{л.вт}} = \frac{0,104 \cdot b_{\text{п}} \cdot h_{\text{пэф}}}{\lambda_{\text{эkv}} \cdot l_{\text{л.в.пр.}} \cdot (b_{\text{п}}^2 + 0,25 \cdot h_{\text{пэф}}^2) \cdot Z_1} + \frac{0,75}{\frac{\lambda_{\text{л.вт}}}{l_{\text{л.в.пр.}} \cdot Z_1 \cdot (b_{\text{п}} + 0,5 \cdot h_{\text{пэф}})}}.$$

Тепловое сопротивление непродуваемого участка

$$R''_{\text{л.вт}} = \frac{\frac{h_{\text{пэф}}}{3 \cdot \lambda_{\text{эkv}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{л.вт}}}}{\pi \cdot D_{\text{л.вт}} \cdot (l_{\text{л.в}} - l_{\text{л.в.пр}})}.$$

Тогда тепловое сопротивление между лобовыми частями обмотки статора и внутренним воздухом определяется по формуле

$$R_{8,10} = R_{9,11} = \frac{1}{\frac{1}{R'_{\text{л.вн}}} + \frac{1}{R''_{\text{л.вн}}} + \frac{1}{R'_{\text{л.вт}}} + \frac{1}{R''_{\text{л.вт}}}}.$$

Выводы

Представлена методика определения тепловых сопротивлений статора в соответствии с указанной ЭТС, эти сопротивления позволяют составить уравнения теплового баланса для частотно-регулируемых АД. Система уравнений теплового баланса является математической моделью теплового состояния частотно-управляемого АД, полученная математическая модель была проверена экспериментально на АД мощностью 2,5 кВт и 15 кВт [5].

Список литературы: 1. Осташевский, Н.А. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя впри различных законах регулирования и типах преобразователей [Текст] / Н.А. Осташевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2009. - № 3. - С. 37 – 41. 2. Осташевский, Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Тематич. вып. науч.-техн. журнала «Электроинформ». – 2009. – С. 266 – 270. 3. Осташевский, Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов». – 2010. – № 16. – С. 89 – 102. 4. Осташевский, Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки [Текст] / Н.А. Осташевский, 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 [Текст] // Электротехника и электромеханика. – 2010. - № 5. - С. 21 – 23. 6. Петренко А.Н. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при пуске [Текст] / А.Н. Петренко, В.П. Шайда, Н.Я. Петренко // Электрика (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.

Bibliography (transliterated): 1. Ostashevskij, N.A. Poteri chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri razlichnyh zakonah regulirovanija i tipah preobrazovatelej N.A. Ostashevskij, V.N. Ivanenko, A.N. Petrenko. Jeлектrotehnika i jeлектromehanika. – 2009. No 3. P. 37 – 41. [Print]. 2. Ostashevskij, N.A. Matematicheskaja model' teplovogo sostojanija chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja v stacionarnyh rezhimakh. N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko. Problemy avtomatizirovannogo jeлектропривода. Teorija i praktika. Tematich. vyp. nauch.-tehn. zhurnala «Jeлектроinform». – 2009. – P. 266 – 270. [Print] 3. Ostashevskij, N.A. Issledovanie teplovogo sostojanija chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri razlichnyh zakonah regulirovanija N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko. Vestnik NTU «HPI». Sbornik nauchnyh trudov. Tematicheskij vypusk «Problemy sovershenstvovanija jeлектрических машин i apparatov». – 2010. – No 16. – P. 89 – 102. [Print]. 4. Ostashevskij, N.A. Issledovanie teplovogo sostojanija chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri izmenenii nagruzki. N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko. Jeлектrotehnika i jeлектromehanika. – 2010. No 3. P. 25 – 29. [Print] 5. Petrenko A.N. Jeksperimental'noe issledovanie nagreva chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri razlichnyh istochnikah pitaniya. Jeлектrotehnika i jeлектromehanika. – 2010. No 5. P. 21 – 23. [Print] 6. Petrenko A.N. Issledovanie teplovogo sostojanija chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja pri puske. A.N. Petrenko, V.P. Shajda, N.Ja.Petrenko. Jeлектрика (Rossija). – 2014. – No 2. – P. 20 – 23. [Print] 7. Reguliruemij jeлектропривод : Jekonomicheskie i tehnologicheskie aspektyj energoresursosberezhenija za schet širokomasshtabnogo vnedrenija reguliruemogoj jeлектропривода. Sajtkompanii UP "PROMJeNERGETIKA" 27 March 2008. [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 jeлектроприводе: ucheb. posob. dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij. V.S.Petrushin. – O.: Naukaitehnika, 2006. – 320 s. 9. Sandler A.S. Chastotnoe upravlenie asinhronnymi dvigateljami. A.S. Sandler, R.S. Sorbatov. – М. –Л.: Jenergija, 1966. – 144 P. [Print]. 10. Borisenko A.I. Aerodinamika i teploperedacha v jeлектрических машинах. A.I. Borisenko, V.G. Dan'ko, A.I. Jakovlev. – М.: Jenergija, 1974. – 560 P. [Print].

Поступила (received) 10.09.2014



Петренко
Александр Николаевич
канд. техн. наук,
старший преподаватель
каф. электрического транспорта,
ХНАГХ



Шайда
Виктор Петрович
канд. техн. наук,
доцент каф. электрич. машин, НТУ
«ХПИ»
E-mail: viktorshayda08@rambler.ru



Петренко
Николай Яковлевич
канд. техн. наук,
доцент каф. электрич. машин, НТУ
«ХПИ»