

УДК 621.313.333

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЕНТИЛЯЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ ОТ СИНУСОИДАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

А. С. ТРЕТЬЯКОВ, О. А. КАПИТОНОВ

*Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»,
г. Могилев, Республика Беларусь*

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, тепловентиляционная модель, электромагнитная модель, энергетическая модель.

Введение

Одним из важных факторов, влияющих на срок службы асинхронных электродвигателей, является обеспечение номинального температурного режима. При этом крайне важно, чтобы вентиляционная система рассматриваемого электродвигателя обеспечивала не только необходимый, но и номинальный объем воздуха, прогоняемый через межреберные каналы, для достижения наилучшего отвода тепловых потерь. Более того, под каждую серию и каждый типоразмер должен быть вентилятор, спроектированный конкретно под данную электрическую машину.

На стадии проектирования любого асинхронного электродвигателя обычно определяется только необходимый объем воздуха для охлаждения электродвигателя при работе под номинальной нагрузкой. На самом деле тепловой и вентиляционный расчеты связаны между собой, воздействуя друг на друга. Цель данной работы – показать эту связь и разработать концепцию модели асинхронного электродвигателя, учитывающую электродинамику, тепловентиляционные процессы, и как итог, энергетическую.

Основная часть

Математическая модель, описывающая тепловентиляционные и энергетические режимы работы асинхронного электродвигателя, состоит из следующих уровней:

- 1) электромагнитная модель;
- 2) энергетическая модель;
- 3) тепловая модель;
- 4) вентиляционная модель.

Рассмотрим подробнее каждый уровень отдельно.

Электромагнитная модель

На рис. 1 приведена разработанная модель асинхронного электродвигателя при питании от синусоидального источника напряжения в тулбоксе Simscape математического пакета Matlab. Представленная модель содержит разработанный на языке Simscape блок, представляющий собой модель асинхронного электродвигателя. Данный блок отличается от стандартного, включенного в состав Matlab блока, моделирующего асинхронный электродвигатель, наличием выходных сигналов – величин потерь в меди обмотки статора электродвигателя (ΔP_1), потерь в стержневой обмотке

ротора (ΔP_2), потерь в стали (ΔP_s), потерь на вентиляцию (ΔP_v). Исходный код блока на языке Simscapе содержит систему дифференциальных уравнений, описывающих преобразование электрической энергии в механическую в асинхронном электродвигателе в осях АВС, приведенную в [1, с. 287–290]. Параметры схемы замещения рассматриваемого асинхронного электродвигателя рассчитывались на основании методики, изложенной в [2, с. 46–57].

Энергетическая модель

Энергетическая модель определяет потери за цикл работы рассматриваемого асинхронного электродвигателя, а также коэффициент полезного действия и коэффициент мощности. Постоянные потери программируются как константы.

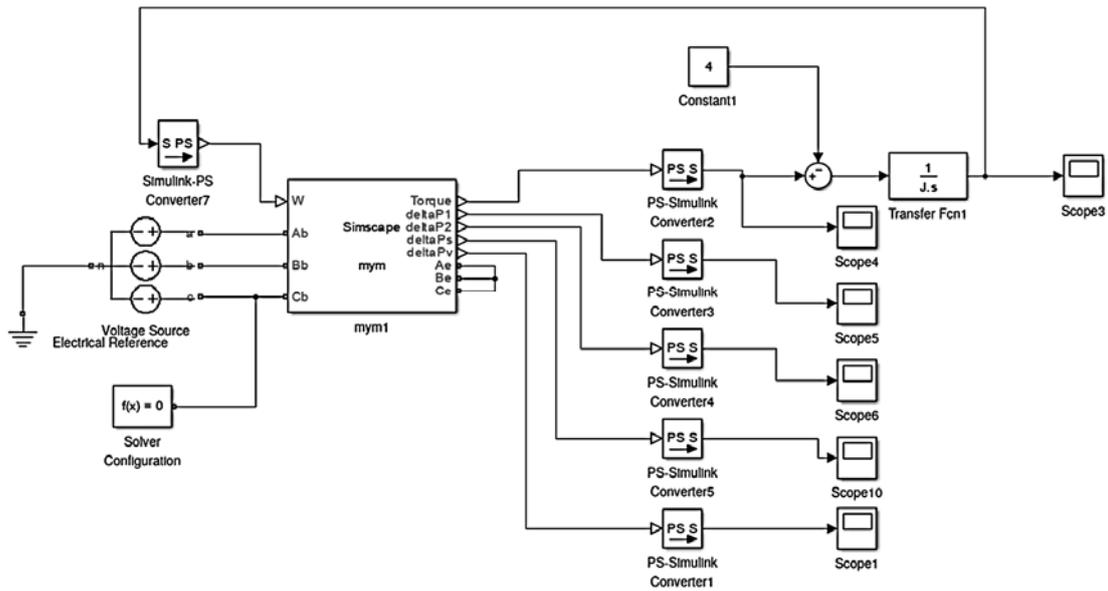


Рис. 1. Компьютерная модель асинхронного электродвигателя при питании от синусоидального источника напряжения в тулбоксе Simscapе

Полученные параметры потерь являются исходными данными для расчета тепловых режимов.

Для расчета величины потерь были использованы следующие зависимости.

Величина потерь в обмотке статора:

$$\Delta P_c = (i_{1a}^2 + i_{1b}^2 + i_{1c}^2)R_1, \tag{1}$$

где i_{1a}^2 , i_{1b}^2 , i_{1c}^2 – мгновенные значения токов в фазах обмотки статора А, В и С соответственно, А; R_1 – сопротивление обмотки статора, Ом.

Величина потерь в стержневой обмотке ротора:

$$\Delta P_p = (i_{2a}^2 + i_{2b}^2 + i_{2c}^2)R_2', \tag{2}$$

где i_{2a}^2 , i_{2b}^2 , i_{2c}^2 – мгновенные приведенные значения токов в фазах А, В и С ротора соответственно, А; R_2' – эквивалентное сопротивление стержневой обмотки ротора, Ом.

Величина добавочных потерь:

$$\Delta P_{доб} = 0,005 P_1. \tag{3}$$

Величина механических потерь:

$$\Delta P_{\text{мех}} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_a^4, \quad (4)$$

где коэффициент $K_T = 1,3(1 - D_a)$ для электродвигателей с $2p = 4$; n – скорость вращения ротора, об/мин; D_a – внешний диаметр статора.

Величина потерь в магнитопроводе статора имеет сложную нелинейную зависимость от частоты и величины напряжения на фазах статора. Для определения величины потерь была разработана модель магнитопровода исследуемого электродвигателя в программе FEMM. В результате моделирования работы электродвигателя в программе FEMM были получены комплексные значения потокосцепления намагничивания электродвигателя для ряда частот тока намагничивания при номинальном амплитудном значении тока намагничивания. Полученная функциональная зависимость была аппроксимирована передаточной функцией, имеющей максимально близкую амплитудно-фазовую частотную характеристику. При этом в электромагнитной модели электродвигателя потокосцепление определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Psi_{\mu\alpha}(p) &= I_{\mu\alpha}(p)W_{\Psi}(p); \\ \Psi_{\mu\beta}(p) &= I_{\mu\beta}(p)W_{\Psi}(p), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Psi_{\mu\alpha}(p)$, $I_{\mu\alpha}(p)$ – изображения по Лапласу потокосцепления намагничивания и тока намагничивания по оси α ; $\Psi_{\mu\beta}(p)$, $I_{\mu\beta}(p)$ – изображения по Лапласу потокосцепления намагничивания и тока намагничивания по оси β ; $W_{\Psi}(p)$ – полученная по изложенной выше методике передаточная функция, связывающая ток намагничивания и потокосцепление намагничивания.

Передаточная функция $W_{\Psi}(p)$ учитывает возникающие в магнитопроводе потери и их зависимость от частоты, таким образом мощность магнитного поля, создаваемого током намагничивания, оказывается уменьшенной на величину потерь в стали, по сравнению с известными моделями без учета данных потерь.

Величина потерь в стали в итоге может быть определена путем вычитания величин всех остальных потерь и выходной мощности P_2 из входной мощности P_1 .

Тепловая модель

Для создания тепловой модели асинхронного электродвигателя был использован метод эквивалентных тепловых схем замещения. Данный метод основан на использовании тепловых сопротивлений, которые соединяются в тепловую сеть, имитирующую реальные пути передачи тепловых потоков в машине, и предполагает аналогию теплового потока с электрическим током, основанную на одинаковой форме основного закона теплопроводности.

Относительно полная картина тепловых потоков в асинхронном электродвигателе приведена в [3, с. 257–259]. Для снижения порядка системы уравнений при незначительном снижении точности расчетов может быть составлена упрощенная структурная тепловая схема замещения электродвигателя, представленная на рис. 2. На указанном рисунке в одинарных окружностях условно обозначены температуры узлов и участков электродвигателя – соответствующих «однородных тел», где выделяются тепловые потери работающего электродвигателя, в двойных окружностях

обозначены температуры «однородных тел» – конструктивных элементов электродвигателя, через которые проходят тепловые потоки. В данном случае рассматриваемый электродвигатель можно представить состоящим из 7 «однородных тел»: статор с обмоткой (температура θ_c), ротор силовой со стержневой обмоткой и вентилятором (θ_p), воздушная зона левой лобовой части (θ_2), станина (θ_3), воздушная зона правой лобовой части (θ_4); воздушная зона вентиляторно-радиаторного охлаждения (θ_5), подшипниковый щит левый (θ_1). Упрощенная тепловая схема замещения рассматриваемого электродвигателя представлена на рис. 2.

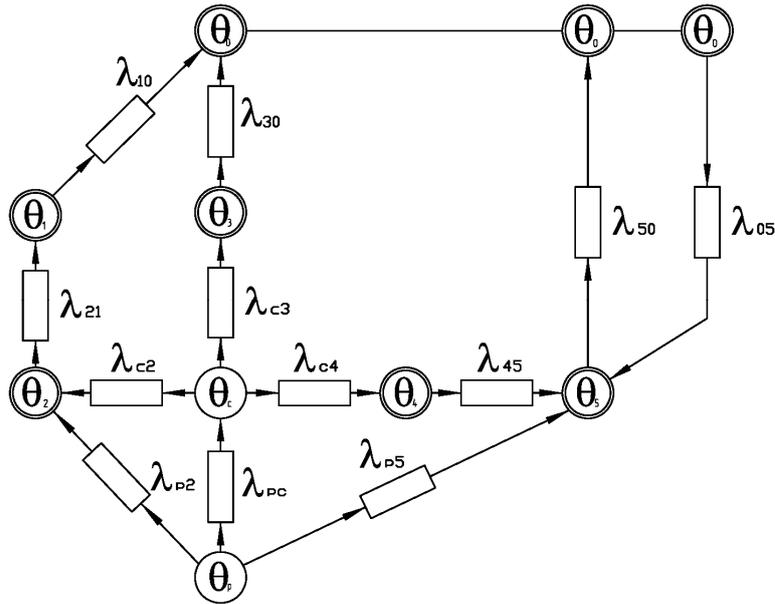


Рис. 2. Упрощенная структурная тепловая схема замещения рассматриваемого асинхронного электродвигателя

Здесь в качестве тепловых проводимостей выступают: λ_{45} – тепловая проводимость от воздушной зоны правой лобовой части к воздушной зоне вентиляторно-радиаторного охлаждения со стороны торцевого конца вала; λ_{c2} – тепловая проводимость от статора с обмоткой к воздушной зоне левой лобовой части со стороны выходного конца вала; λ_{c4} – тепловая проводимость от статора с обмоткой к воздушной зоне правой лобовой части со стороны торцевого конца вала; λ_{c3} – тепловая проводимость от статора с обмоткой к станине; λ_{10} – тепловая проводимость от подшипникового щита левого к воздушной зоне окружающей среды со стороны выходного конца вала; λ_{50} – тепловая проводимость от воздушной зоны вентиляторно-радиаторного охлаждения к воздушной зоне окружающей среды со стороны торцевого конца вала; λ_{30} – тепловая проводимость от станины к воздушной зоне окружающей среды; λ_{21} – тепловая проводимость от воздушной зоны левой лобовой части к подшипниковому щиту левому со стороны выходного конца вала; $\lambda_{p,c}$ – тепловая проводимость от ротора силового со стержневой обмоткой и вентилятором к статору с обмоткой; λ_{p2} – тепловая проводимость от ротора силового со стержневой обмоткой и вентилятором к воздушной зоне левой лобовой части со стороны торцевого конца вала;

λ_{p5} – тепловая проводимость от ротора силового со стержневой обмоткой и вентилятором к воздушной зоне правой лобовой части со стороны торцевого конца вала; λ_{50} – тепловая проводимость от воздушной зоны вентиляторно-радиаторного охлаждения к воздушной зоне окружающей среды со стороны торцевого конца вала.

Данная тепловая схема описывается следующей системой уравнений теплообмена:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_c &= \theta_c (\lambda_{c2} + \lambda_{c4} + \lambda_{p.c} + \lambda_{c3}) - \theta_2 \lambda_{c2} - \theta_3 \lambda_{c3} - \theta_p \lambda_{p.c} - \theta_4 \lambda_{c4}; \\
 \Delta P_p &= \theta_p (\lambda_{c2} + \lambda_{p5} + \lambda_{p.c}) - \theta_2 \lambda_{c2} - \theta_5 \lambda_{p5} - \theta_c \lambda_{p.c}; \\
 0 &= \theta_1 (\lambda_{10} + \lambda_{21}) - \theta_0 \lambda_{10} - \theta_2 \lambda_{21}; \\
 0 &= \theta_2 (\lambda_{21} + \lambda_{c2} + \lambda_{p2}) - \theta_c \lambda_{c2} - \theta_p \lambda_{p2} - \theta_1 \lambda_{21}; \\
 0 &= \theta_3 (\lambda_{30} + \lambda_{c3}) - \theta_0 \lambda_{30} - \theta_c \lambda_{c3}; \\
 0 &= \theta_4 (\lambda_{c4} + \lambda_{45}) - \theta_c \lambda_{c4} - \theta_5 \lambda_{45}; \\
 0 &= \theta_5 (\lambda_{50} + \lambda_{05} + \lambda_{p5} + \lambda_{45}) - \theta_0 \lambda_{50} - \theta_0 \lambda_{05} - \theta_p \lambda_{p5} - \theta_4 \lambda_{45}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Для нестационарных режимов работы рассматриваемого асинхронного электродвигателя можно записать:

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{d\theta_c}{dt} &= \Delta P_c - \theta_c (\lambda_{c2} + \lambda_{c4} + \lambda_{p.c} + \lambda_{c3}) + \theta_2 \lambda_{c2} + \theta_3 \lambda_{c3} + \theta_p \lambda_{p.c} + \theta_4 \lambda_{c4}; \\
 C_2 \frac{d\theta_p}{dt} &= \Delta P_p - \theta_p (\lambda_{c2} + \lambda_{p5} + \lambda_{p.c}) + \theta_2 \lambda_{c2} + \theta_5 \lambda_{p5} + \theta_c \lambda_{p.c}; \\
 C_3 \frac{d\theta_1}{dt} &= -\theta_1 (\lambda_{10} + \lambda_{21}) + \theta_0 \lambda_{10} + \theta_2 \lambda_{21}; \\
 C_4 \frac{d\theta_2}{dt} &= -\theta_2 (\lambda_{21} + \lambda_{c2} + \lambda_{p2}) + \theta_c \lambda_{c2} + \theta_p \lambda_{p2} + \theta_1 \lambda_{21}; \\
 C_5 \frac{d\theta_3}{dt} &= -\theta_3 (\lambda_{30} + \lambda_{c3}) + \theta_0 \lambda_{30} + \theta_c \lambda_{c3}; \\
 C_6 \frac{d\theta_4}{dt} &= -\theta_4 (\lambda_{c4} + \lambda_{45}) + \theta_c \lambda_{c4} + \theta_5 \lambda_{45}; \\
 C_7 \frac{d\theta_5}{dt} &= -\theta_5 (\lambda_{50} + \lambda_{05} + \lambda_{p5} + \lambda_{45}) + \theta_0 \lambda_{50} + \theta_0 \lambda_{05} + \theta_p \lambda_{p5} + \theta_4 \lambda_{45},
 \end{aligned} \tag{7}$$

где C_i – теплоемкость i -го узла рассматриваемого асинхронного электродвигателя, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^\circ\text{C}}$.

В системе уравнений (6) и (7) параметры θ означают превышение температуры над температурой окружающей среды ($\theta_0 = 0$ °C), параметры ΔP определяют потери в соответствующих «однородных телах», в частности:

1) потери в статоре:

$$\Delta P_c = \Delta P_m^1 + \Delta P_z^1 + \Delta P_c^1 + \Delta P_l^1 + \Delta P_l^2, \tag{8}$$

где ΔP_m^1 – потери в обмотке статора, Вт; ΔP_z^1 – потери в зубцах статора, Вт; ΔP_c^1 – потери в стали статора, Вт; ΔP_l^1 , ΔP_l^2 – потери в лобовых обмотках, Вт.

2) потери в силовом роторе:

$$\Delta P_p = \Delta P_a^1 + \Delta P_z^2 + \Delta P_c^2, \quad (9)$$

где ΔP_a^1 – потери в обмотке ротора, Вт; ΔP_z^2 – потери в зубцах статора, Вт; ΔP_c^2 – потери в стали ротора, Вт.

Потери ΔP_z^1 , ΔP_Δ^1 , ΔP_Δ^2 , ΔP_z^2 , ΔP_c^2 определяются по методике, представленной в [5].

Исходными данными для расчета тепловых режимов являются:

- 1) геометрические размеры двигателя для расчета тепловых проводимостей и теплоемкостей узлов эквивалентной схемы замещения;
- 2) результат работы энергетической модели (потери в отдельных узлах электродвигателя);
- 3) результат работы вентиляционной модели (вентиляционные потери).

Итогом работы данной модели является вектор температур отдельных узлов рассматриваемого асинхронного электродвигателя.

Вентиляционная модель

Для определения влияния вентиляции на тепловые процессы в рассматриваемом асинхронном электродвигателе можно воспользоваться его упрощенной вентиляционной схемой замещения, представленной на рис. 3.

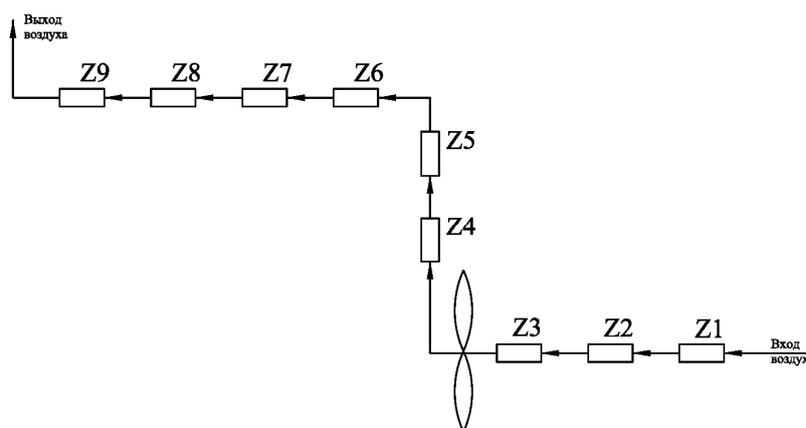


Рис. 3. Упрощенная вентиляционная схема замещения рассматриваемого асинхронного электродвигателя

В схеме замещения приведены следующие обозначения аэродинамических сопротивлений: Z_1 – сопротивление входа в подшипниковый щит через входные отверстия; Z_2 – сопротивление выхода из подшипникового щита через входные отверстия; Z_3 – сопротивление поворота потока воздуха перед входом в силовой вентилятор; Z_4 – сопротивление потока воздуха за силовым вентилятором; Z_5 – сопротивление поворота потока воздуха в направляющем кожухе; Z_6 – сопротивление поворота потока воздуха перед входом в межреберные каналы под кожухом; Z_7 – сопротивление поворота потока воздуха входа в межреберные каналы под кожухом; Z_8 – сопротивление поворота потока воздуха в межреберных каналах под кожухом; Z_9 – сопротивление выхода потока воздуха из межреберных каналов в воздушное пространство.

Суммарное сопротивление вентиляционной цепи электродвигателя при его работе в номинальном:

$$Z_{\text{эвл}} = \sum_{i=1}^9 Z_i. \quad (10)$$

Расчет аэродинамических сопротивлений можно произвести по методике, предложенной в [5], [6]. Расчет производительности Q и напора H производится на основании параметров вентилятора [6].

Моделирование тепловых режимов

На основе методик, изложенных ранее, была создана комплексная тепловентиляционная модель. В качестве испытуемого был взят асинхронный электродвигатель АИР100S4. Результаты моделирования представлены в таблице.

Расчетные и экспериментальные температуры рассматриваемого электродвигателя

Параметр	АИР100S4 (расчетные температуры)	АИР100S4 (экспериментальные температуры)
Температура перегрева обмотки статора, °С	82	81,5
Температура перегрева статора, °С	72	73
Температура перегрева силового ротора, °С	70	71
Температура перегрева станины, °С	55	54
Температура перегрева воздушной зоны левой лобовой части, °С	64	65
Температура перегрева воздушной зоны правой лобовой части, °С	64	65
Температура перегрева воздушной зоны вентиляторно-радиаторного охлаждения справа, °С	29	28

Экспериментальное исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя

Для экспериментального исследования тепловентиляционных режимов использовался научно-исследовательский комплекс, представленный на рис. 4. Для измерения температур перегрева отдельных узлов испытуемого асинхронного электродвигателя использовались термопреобразователи сопротивления, которые были смонтированы непосредственно на испытуемый электродвигатель. Эти датчики с помощью экранированного кабеля подключены к двухканальным измерителям ТРМ-200. Для передачи и сохранения информации на верхний уровень приборы ТРМ-200 были объединены в промышленную сеть RS-485, через которую они подключались к архиватору МСД-200. Данный прибор опрашивал измерители ТРМ-200 и считывал показания с термопреобразователей. Далее он записывал их себе в память и передавал на персональный компьютер для отображения информации в текстовом и графическом виде. В качестве программного обеспечения использовался программный пакет Trace Mode v5. В результате были получены экспериментальные данные, представленные в таблице.

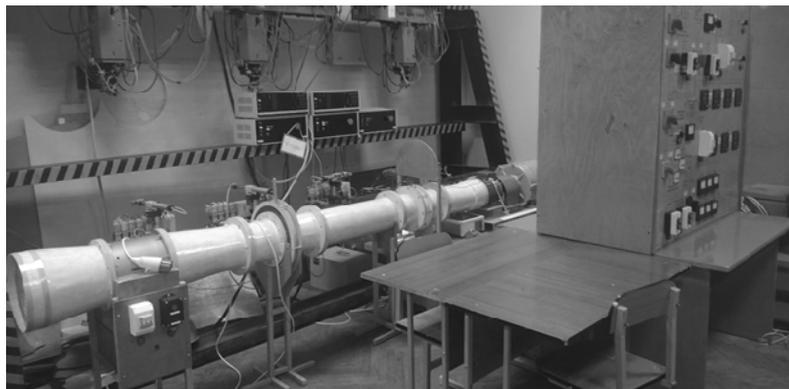


Рис. 4. Научно-исследовательский комплекс

Верификация полученных данных

Относительная погрешность полученных данных не превышает 3 %. Как видно, модель ведет себя адекватно.

Заключение

В результате проделанной работы:

1. Разработана модель асинхронного электродвигателя с возможностью расчета величины потерь энергии в обмотках статора, ротора, в магнитопроводе, затрат энергии на вентиляцию.
2. Разработана комплексная модель асинхронного электродвигателя, позволяющая производить расчет одновременно электромагнитных и тепловентиляционных процессов в различных режимах работы.
3. Адекватность разработанных моделей подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями.

Литература

1. Парфенович, О. Н. К вопросу о повышении надежности работы асинхронных электродвигателей / О. Н. Парфенович, А. С. Третьяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 114–121.
2. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
3. Фираго, Б. И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов : учеб. пособие / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.
4. Асинхронные двигатели общего назначения / Е. П. Бойко [и др.] ; под ред. В. М. Петрова и А. Э. Кравчика. – М. : Энергия, 1980. – 254 с.
5. Парфенович, О. Н. Элементы теории тепловых процессов электродвигателя по конструктивной схеме ДАС с трехроторной электромеханикой / О. Н. Парфенович, А. С. Третьяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 179–187.
6. Виноградов, В. И. Вентиляторы электрических машин / В. И. Виноградов. – Л. : Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1980. – 200 с. : ил.

Получено 26.10.2016 г.