

УДК 621.313.33

UDC 621.313.33

**ЧЕТЫРЁХМАССОВАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**FOUR MASSIVE THERMAL MODEL OF  
ELECTRIC DRIVE**

Таранов Дмитрий Михайлович  
к.т.н., доцент кафедры ЭЭО и ЭМ

Taranov Dmitriy Mikhailovich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor of EEE and EM

Лыткин Алексей Владимирович  
аспирант кафедры ЭЭО и ЭМ

Lytkin Aleksey Vladimirovich  
postgraduate student of EEE and EM

Каун Олег Юрьевич  
ассистент кафедры ИТ и УС  
*Азово-Черноморский Инженерный Институт  
“Донской Государственный Агроинженерный Уни-  
верситет”, г. Зерноград, Россия*

Kaun Oleg Yurievich  
assistant of IT and CS  
*Azov-Black Sea State Engineering Institute  
“Don State Agrarian University”,  
Zernograd, Russia*

В статье представлена четырёхмассовая тепловая модель электропривода, позволяющая определять тепловое состояние электродвигателей в тормозных режимах работы электропривода

This article offers four masses thermal model system that allows you to determine the thermal state of the motor in the brake of the drive

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ, РАБОТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Keywords: ASYNCHRONOUS DRIVE, THERMAL MODEL, WORK OF MOTOR

Все режимы работы электродвигателей сопровождаются выделением тепла во внутренних частях машины. Именно нагрев изоляции обмоток, является одной из основных причин отказов электродвигателей. В этой связи, представляется актуальным улучшение контроля за процессом нагрева и прогнозирование теплового состояния электродвигателя в сложных режимах работы электроприводов (механические перегрузки, работа с пониженным напряжением, режимы торможения, частые пуски и т.д.).

Преобразование энергии в электрической машине сопровождается необратимыми потерями, проявляющимися в виде теплоты, выделение которой в активных частях нарушает тепловую однородность машины. Это ведет к перетоку теплоты от активных частей к элементу конструкции и внешней среде, так что электрическая машина является не только электро-механической, но и тепловой системой. Источниками теплоты в электрической машине являются активные части (обмотки и сердечники), подшипники, щеточно-коллекторный узел. Следует учитывать также трение

вращающихся деталей о среду внутри машины и вентиляционные потери. Потери в электрических машинах делят на четыре группы: электрические (в обмотках и в щеточно-коллекторном узле), магнитные (на гистерезис и вихревые токи), добавочные (в стали и обмотках), механические (на трение и на перемещение охлаждающей среды). Основная часть потерь определяется в ходе электромагнитного расчёта и при анализе электрической машины как тепловой системы /1/.

В тепловом отношении электрическая машина – это совокупность твёрдых тел, в которых процесс теплообмена формирует поле температуры  $T$  в соответствии с распределением величин, характеризующих геометрические, физические, энергетические свойства тел и условия их взаимодействия с окружающей средой. Основным параметром электромашины как тепловой системы является поле  $T$ , формирующим – поле плотности тепловыделения и параметры, определяющие интенсивность процесса теплопередачи. Последние включают не только коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  и теплопередачи  $\alpha$ , но и геометрию системы, в сочетании, устанавливаемом исходя из основных законов теплопереноса в твёрдых телах и на их границах /2/.

Границы тепловой системы и охлаждающая среда являются в то же время частью гидравлической системы, включающие также пассивные (в тепловом отношении) пути для прохода охладителя и нагнетатели, обеспечивающие его движение.

При эксплуатации следует стремиться, к тому, чтобы внутри машины не превышалась определённая средняя температура. Максимальные температуры внутри активных частей требуют особого ограничения и контроля.

Как известно, существует несколько видов диагностики нагрева двигателей. Первый носит название “тепловой контроль” (ТК). Особенностью применения данного метода является возможность получения опера-

тивной информации на работающем оборудовании. Регулярное проведение ТК на объектах энергетики показывает его высокую эффективность – это доказывается резким снижением количества аварийных выходов из строя оборудования, на котором проводится ТК. Применение тепловизионной диагностики основано на том, что наличие практически всех видов дефектов оборудования вызывает изменение температуры поврежденных элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного излучения, которое может быть зарегистрировано тепловизионными приборами /3/.

Однако метод имеет ряд недостатков. Тепловизоры могут позволить нам увидеть только общую картину, не позволяя выяснить, какая часть двигателя вышла из строя. При довольно большой стоимости они не имеют большой точности, и наоборот – обладают высокой погрешностью, поэтому их применение для диагностики состояния электродвигателей сопряжено с известными трудностями.

Второй метод – контроль теплового состояния с помощью встроенных в обмотку двигателя датчиков температуры (термопар, полупроводниковых позисторов и терморезисторов). Этот метод гораздо менее затратен и более точен /3/.

Недостатками данного метода являются: инерционность и погрешность датчиков, возможность получения данных только в отдельных точках двигателя, невозможность контроля температуры в роторе, что особенно важно при использовании электродвигателя в режимах торможения. Тепловые выключатели не защищают двигатель при блокировке ротора.

Наряду с существующими методами в последнее время активно развивается компьютерное моделирование для построения моделей исследуемого объекта. Поскольку постановка физических экспериментов над принципиально новым приводом является дорогостоящим процессом, особое внимание уделено созданию математической модели, описывающей

основные процессы и свойства исследуемого двигателя. Математическое моделирование позволяет на этапе первичного (предварительного) изучения определиться с основными техническими параметрами, выявить их влияние друг на друга и на выходные параметры проектируемого привода.

Многомассовая тепловая модель двигателя представляет из себя  $n$  сосредоточенных масс, соединенных вязкоупругими элементами. Любая эквивалентная схема, в которой количество масс более двух, характеризуется системой дифференциальных уравнений, которые могут быть решены численными методами.

Для математического описания механической системы, состоящей из  $n$  сосредоточенных масс, соединенных вязкоупругими элементами, применяется принцип Даламбера, который применительно к произвольной системе был предложен Ж. Лагранжем в 1760 г..

Для получения математической модели, характеризующей динамику механической системы, в основу положено уравнение Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{n}'} - \frac{\partial T}{\partial n} = - \frac{\partial \Pi}{\partial n} - \frac{\partial \Phi}{\partial n'} + P_n \quad (1)$$

где  $n$  – обобщенная координата, м;

$t$  – текущее время, с;

$T, \Pi$  – кинетическая и потенциальная энергии системы, Нм;

$\Phi$  – диссипативная функция, характеризующая силы вязкого сопротивления, Нмс<sup>-1</sup>;

$P_n$  – обобщенная сила, Н.

Уравнение (1) используют для изучения динамических процессов любой механической системы, независимо от того, сколько масс входит в систему, как движутся эти массы и какое движение рассматривается (абсолютное или относительное). Системы дифференциальных уравнений имеют общие закономерности, которые позволяют в дальнейшем, при наличии

эквивалентной схемы машины, записывать математическую модель без общих выводов, позволяя её варьировать.

Были рассмотрены несколько эквивалентных схем двигателя.

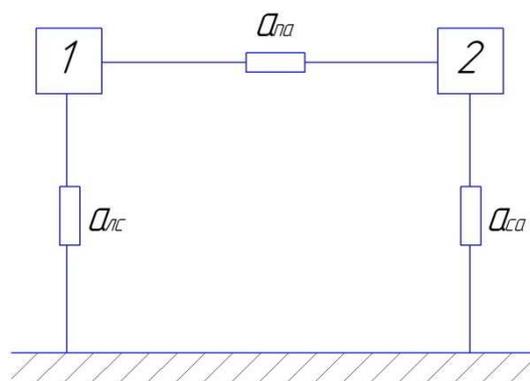


Рисунок 1 – Двухмассовая тепловая схема замещения двигателя.

Цифрами 1 и 2 обозначены обмотка и сердечник статора соответственно. От такой модели было решено отказаться из-за неимения в ней ротора и общих неточных результатов.

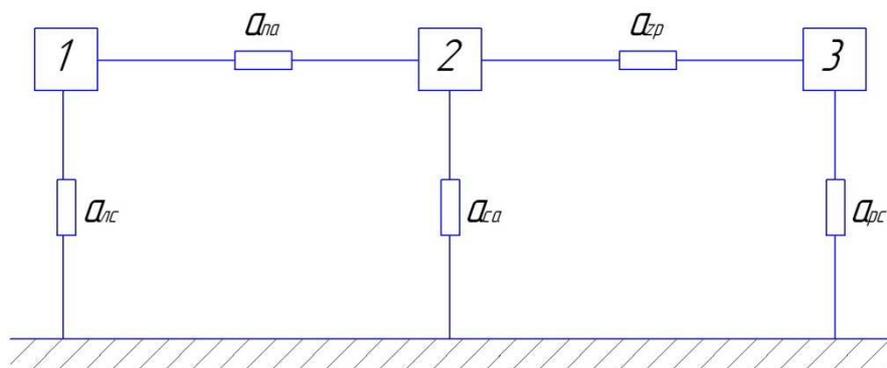


Рисунок 2 – Трёхмассовая тепловая схема замещения двигателя.

Цифрами 1, 2 и 3 обозначены обмотка статора, сердечник статора и ротор соответственно. Модель оказалась более пригодна к рассмотрению тепловых закономерностей при двигательном режиме работы, но погрешности по отношению к опытным данным все еще высоки – 10-15%.

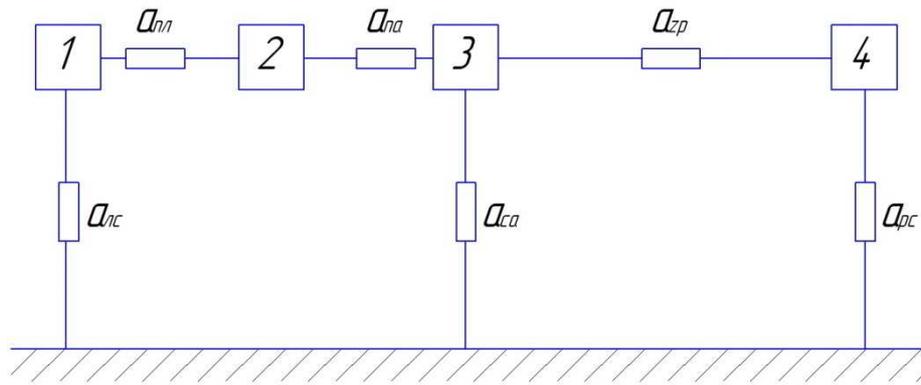


Рисунок 3 – Четырёхмассовая тепловая схема замещения двигателя.

Цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены лобовая часть обмотки статора, пазовая часть обмотки статора, сердечник статора и ротор соответственно. Разбиение обмотки статора на две части сильно усложнило процесс моделирования, но не дало существенных улучшений в плане точности. Поэтому в результате было решено остановиться на следующей модели.

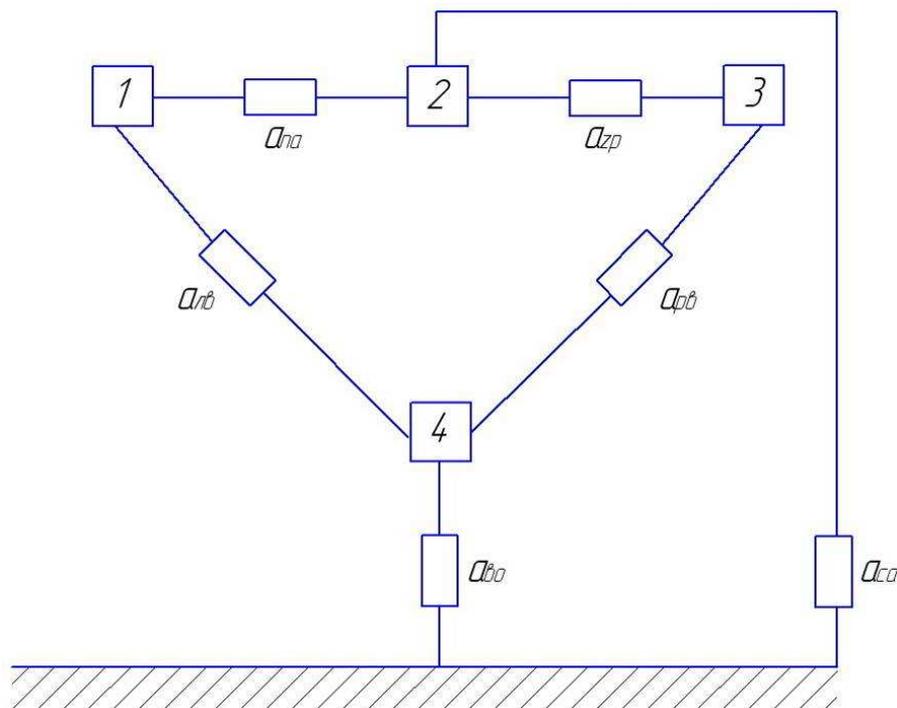


Рисунок 4 – Четырёхмассовая тепловая схема замещения двигателя.

Цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены обмотка статора, сердечник статора, ротор и внутренний вентиляционный воздух соответственно. В четвертом варианте, как и в третьем, имеется четыре элемента, но, в отличие от третьего, обмотка статора здесь представлена одним элементом, а в каче-

стве четвёртого элемента включён внутренний вентиляционный воздух. В отношении соединения эквивалентных теплопроводностей четвертая схема является более правильной, чем третья. Вследствие этого результаты моделирования в четвёртом варианте следует считать ближе к действительности. В этих вариантах разница в превышении температуры обмотки статора в кратковременных режимах работы достигает наибольшего значения, несколько больше 3°C, в режиме максимальной регламентированной продолжительности 90 мин.

Согласно полученной модели была сформулирована математическая модель нагрева. Она представляет из себя систему четырёх уравнений.

$$\frac{d\theta_M}{dt} = \frac{P_M}{C_M} - \frac{\lambda_{ЛВ} + \lambda_{ЛПА}}{C_M} \theta_M + \frac{\lambda_{ЛПА}}{C_M} \theta_B + \frac{\lambda_{ЛВ}}{C_M} \theta_C, \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_C}{dt} = \frac{P_C}{C_C} - \frac{\lambda_{ЗФ} + \lambda_{ЛПА} + \lambda_{СО}}{C_C} \theta_C + \frac{\lambda_{ЛПА}}{C_C} \theta_M + \frac{\lambda_{ЗФ}}{C_C} \theta_P, \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_P}{dt} = \frac{P_P}{C_P} - \frac{\lambda_{ЗФ} + \lambda_{ФВ}}{C_P} \theta_P + \frac{\lambda_{ЗФ}}{C_P} \theta_C + \frac{\lambda_{ФВ}}{C_P} \theta_B, \quad (4)$$

$$\frac{d\theta_B}{dt} = \frac{P_B}{C_B} - \frac{\lambda_{ЛВ} + \lambda_{ФВ} + \lambda_{ВО}}{C_B} \theta_B + \frac{\lambda_{ЛВ}}{C_B} \theta_M + \frac{\lambda_{ФВ}}{C_B} \theta_P, \quad (5)$$

где  $\theta$  – температура в заданной части машины, °С;

$t$  – время, с;

$P$  – мощности потерь, Вт;

$C$  – теплоёмкости, Вт/°С;

$\lambda$  – теплопроводности между частями машины, Вт/°С.

Эту систему дифференциальных уравнений можно было решить численными методами, но для уменьшения громоздкости расчётов система была сформирована в среде объектно-ориентированного программирования, программе MBTU. На примере двигателя АИР180М2, мощностью 30кВт, была проверена работоспособность модели.

Были получены и проанализированы графики нагрева каждой из частей двигателя. Пунктирной линией на графиках обозначены опытные данные, сплошной – найденные моделированием.

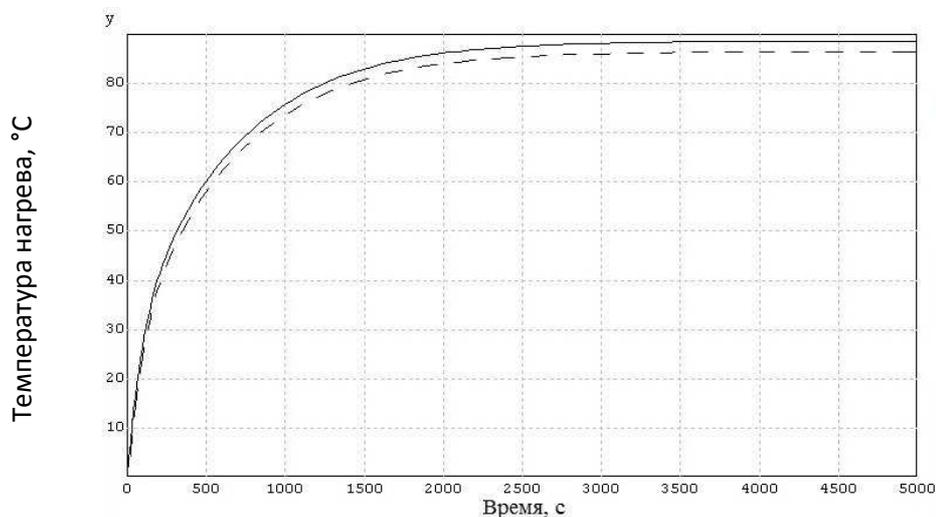


Рисунок 5 – Результаты моделирования нагрева обмотки статора АИР180М2.

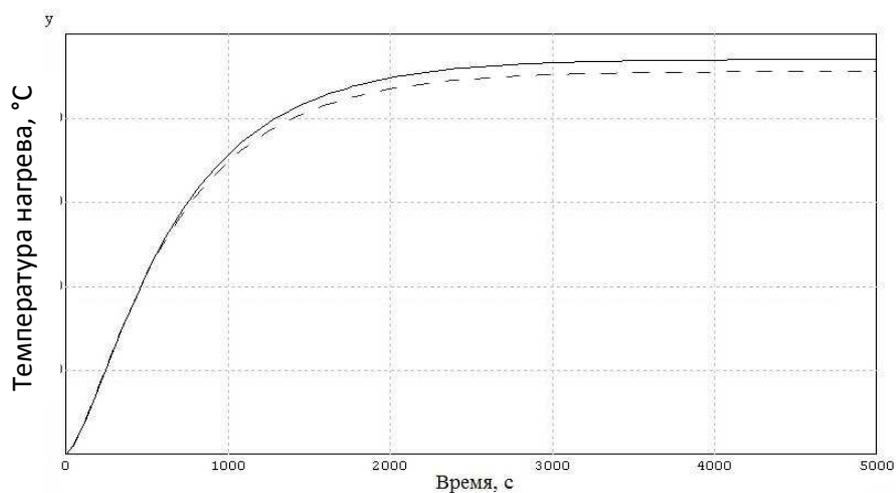


Рисунок 6 – Результаты моделирования нагрева сердечника статора АИР180М2.

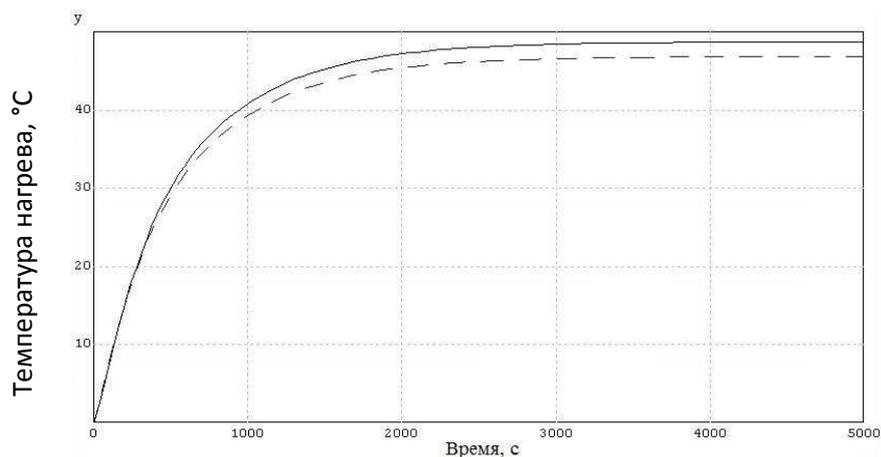


Рисунок 7 – Результаты моделирования нагрева ротора АИР180М2.

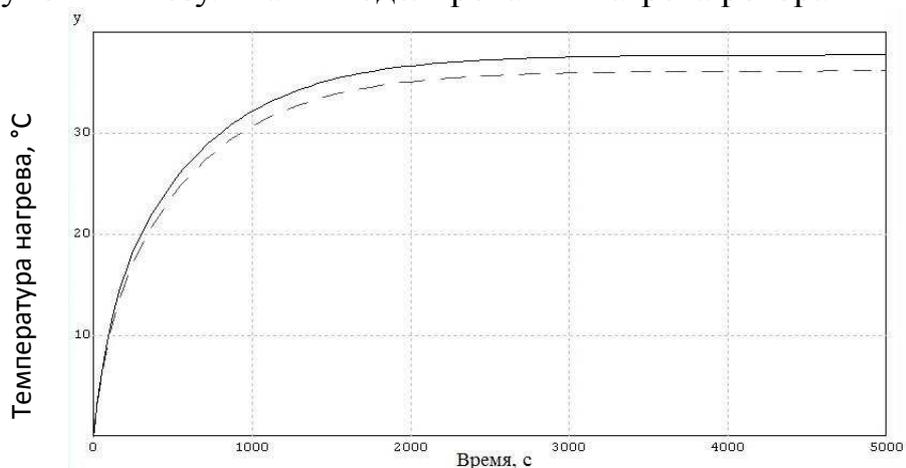


Рисунок 8 – Результаты моделирования нагрева вентиляционного воздуха АИР180М2.

Опытные кривые отличаются от расчетных. При установившемся режиме кривая нагрева обмотки статора почти совпадает с кривой, полученной экспериментальным путем. При кратковременных режимах опыт-ная кривая даёт заниженный нагрев обмотки. Разница в нагревах по рас-четной и опытным кривым тем больше, чем меньше продолжительность кратковременного режима. Это объясняется остыванием обмотки при от-ключении ее на время замера данных опыта. С учетом поправки на осты-вание опытная кривая расположится заметно выше.

Заниженное превышение температуры сердечника статора по экс-периментальной кривой можно объяснить тем, что при опыте температура

замерялась на стыке между станиной и сердечником, где она ниже расчетной температуры, определяемой по методу эквивалентных тепловых схем.

Таким образом, из рассмотренных вариантов тепловых схем замещения наиболее точно отражает превышения температуры в машине четвертый вариант схемы. В этом варианте расчетное значение установившейся температуры обмотки статора практически совпадает с опытным. Дальнейшее увеличение числа элементов в схеме замещения значительно усложнит программу расчётов, но не приведёт к повышению точности.

Данная модель работоспособна и дает результаты, которые отличаются от полученных экспериментом не более чем на 3-5%, что вполне допустимо. Структуру модели предполагается использовать для определения теплового состояния электродвигателей в тормозных режимах работы электроприводов.

### **Литература**

- /1/ Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. – Москва.: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.
- /2/ Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – Москва.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
- /3/ Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – Москва.: Энергия, 1980. – 491 с.
- /4/ Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах. – Москва.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
- /5/ Петриков Л.В., Корначенко Г.Н. Асинхронные электродвигатели. Справочник. – Москва.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
- /6/ Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – Москва.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

### **References**

- /1/ Gotter G. Nagrevaniye i okhlazhdenie elektricheskikh mashin. – Moskva.: Gosenergoizdat, 1961. – 480 s.
- /2/ Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin. – Moskva.: Energoatomizdat, 1983. – 296 s.
- /3/ Kopylov I.P. Proektirovanie elektricheskikh mashin. – Moskva.: Energiya, 1980. – 491 s.
- /4/ Sipaylov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. Teplovye, gidravlicheskie i aerodinamicheskie raschety v elektricheskikh mashinakh. – Moskva.: Vyssh. shk., 1989. – 239 s.

/5/ Petrikov L.V., Kornachenko G.N. Asinkhronnye elektrodvigateli. Spravochnik – Moskva.: Energoatomizdat, 2000. – 496 s.

/6/ Dorf R., Bishop R. Sovremennye sistemy upravleniya. – Moskva.: Laboratoriya bazovykh znaniy, 2002. – 832 s.