ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.333

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ДВУХСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.А. Шевченко, З.С. Темлякова, Д.М. Топорков, А.А. Темляков

Новосибирский государственный технический университет

Предметом исследования являются двухскоростные асинхронные двигатели типа АВЦ производства НПО «ЭЛСИБ» ПАО с двумя независимыми обмотками в статоре, предназначенные для привода главных циркуляционных насосов атомных станций, а также аналогичных механизмов в иных отраслях народного хозяйства. В статье рассмотрены частные вопросы полного цикла расчета рассматриваемой электрической машины. Предлагается метод исследования взаимного влияния обмоток статора при работе электродвигателя, базирующийся на фундаментальных положениях теории электрических машин, с применением численного моделирования. Также предложен способ выбора применяемого воздухоохладителя при тепловом расчете с учетом особенностей исследуемого типа машин. Цель исследования заключается в оптимизации полного цикла расчета вновь разрабатываемых двигателей подобного типа. Это обусловлено возникновением дополнительных нагревов в одной обмотке статора вследствие работы другой, что увеличивает трудозатраты при тепловом расчете, выражаемые в необходимости учета дополнительного источника тепла. Кроме того, имеющиеся эмпирические зависимости не в полной мере отражают всей физической картины происходящих процессов. Оригинальность исследования заключается в том, что на основе известных положений путем автоматизации модифицирован алгоритм расчета применяемого воздухоохладителя, обеспечивающего корректную защиту от последствий теплового перегрева. Показано, что путем численного моделирования можно минимизировать трудозатраты на определение учитываемых при дальнейшем тепловом расчете параметров, возникающих вследствие взаимного влияния обмоток статора выбранного типа машин. Результаты исследования апробированы в производстве НПО «ЭЛСИБ» ПАО и представлены на конкретном примере двигателя.

Ключевые слова: многоскоростной асинхронный двигатель, численное моделирование, математическое моделирование, электромагнитная вибрация, воздухоохладитель, JavaScript.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-52-71

Введение

Исследованием электромагнитных и тепловых состояний электротехнического оборудования занимаются многие научные школы. Вопросы, касающиеся тепловых перегревов и возникновения вибрации различных частей электрооборудования, появляющихся под воздействием электромагнитных полей, являются актуальными на протяжении десятилетий. Это подтверждается современными научными публикациями как известных российских научных школ (университеты и научнопроизводственные объединения городов Санкт-Петербург, Красноярск, Новосибирск) [1–8], так и зарубежных (университет г. Падуя, Италия) [9].

Зачастую в процессе эксплуатации требуется ступенчатое регулирование скорости, поэтому наиболее популярным вариантом комплектации техники является многоскоростной электродвигатель, чаще всего – двухскоростной. Частные вопросы режимов работы двигателя подобного типа отражены в работе авторов [10]. Особенностью таких машин является наличие двух (сопряженных либо раздельных) обмоток в одном статоре, что позволяет получить два комплекта пар полюсов

и две скорости вращения ротора. Подобные силовые агрегаты появились давно и сегодня им на смену приходят электродвигатели с частотными преобразователями. Прежде всего, преобразователи частоты позволяют существенно снизить пусковые токи. Кроме этого, большинство современных двигателей может использовать переменный ток с частотой, которая (при промышленной частоте 50 Гц) меняется от 25 до 60 Гц, что без труда позволяет регулировать число оборотов в диапазоне от 50 до 120 % от номинальной скорости вращения ротора. Однако в связи с тем, что двухскоростные двигатели имеют надежную и простую конструкцию, а главное, относительно дешевы, их продолжают устанавливать, в том числе и на самое современное оборудование, используемое на атомных электростанциях.

Методика расчета любой электрической машины содержит следующие основные блоки: разработка технического задания, электромагнитный расчет, вентиляционный расчет, тепловой расчет. И только после выполнения теплового расчета делается заключение: соответствуют ли технические характеристики разработанной машины требованиям технического задания и соответствующим Госстандартам. Неотъемлемой частью теплового расчета крупных асинхронных электродвигателей с замкнутой системой вентиляции является правильный выбор геометрии воздухоохладителя. При выполнении теплового расчета тихоходного асинхронного двигателя существенную трудность составляет нахождение коэффициента теплопередачи воздухоохладителя $K(v_a, v_w)$, кВт/(м² · K), являющегося функцией двух переменных: скорости набегающего потока воздуха v_a для различных скоростей хладагента (воды) в трубках v_w . Данный коэффициент показывает, какое количество теплоты переходит в единицу времени от более нагретого теплоносителя к менее нагретому через 1 м² теплообменной поверхности при разности температур между теплоносителями в 1 К. Конечная же цель расчета коэффициента – нахождение запаса теплопередачи воздухоохладителя для корректного выбора теплообменника, требуемого при производстве машины.

Решаемая задача сводится к следующему.

- 1. Оценке наводимой ЭДС в низковольтной обмотке статора при работе высоковольтной и, наоборот, в высоковольтной обмотке статора при работе низковольтной при проектировании двухскоростного двухобмоточного асинхронного электродвигателя с замкнутой системой вентиляции.
- 2. Автоматизации нахождения коэффициента теплопередачи воздухоохладителя на основе имеющихся эмпирических зависимостей с целью уменьшения трудоемкости и времени теплового расчета.

1. Двухскоростные асинхронные двигатели

На сегодняшний день двухскоростные электродвигатели можно встретить во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их используют при комплектации такого оборудования, как лифты, буровые установки, крановые установки, лебедки, промышленные станки, вентиляторы, циркуляционные механизмы и т.д. Преимуществом таких двигателей при правильном проектировании являются высокая производительность, высокий пусковой момент, минимальная вибрация, невысокий уровень шума. Изготовление двухскоростных двигателей проходит на базе односкоростных, поэтому их габаритные и подсоединительные параметры в целом аналогичны. Главное отличие — в обмотке статора, также в ряде случаев применяется двухклеточная обмотка ротора. Еще одним существенным отличием двухскоростного двигателя от типовой электрической машины с частотным преобразователем является разная мощность при разных скоростях вращения. Несмотря на удобство в эксплуатации, более современные электродвигатели, работающие

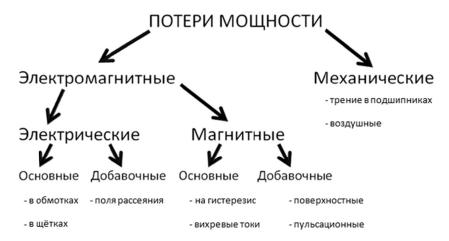
с преобразователями частоты, потребляют постоянную мощность, что критически может отразиться на работе двигателя в случае возникновения аварийной ситуации и необходимости переключения на более низкие обороты при более низкой потребляемой двигателем мощности.

Как отмечено выше, двухскоростные электродвигатели могут выполняться с одной обмоткой либо же с двумя независимыми обмотками статора. Схемы двухскоростных электродвигателей с одной обмоткой позволяют путем переключения полюсов получить скорости в соотношении 1:2 или меньше. Две независимые обмотки дают более глубокое изменение скоростей.

В случаях, когда требуется переключение скоростей в тихоходных двигателях, поставляемых для нужд АЭС, зачастую применяются двухобмоточные схемы подключения. Такая конструкция проще: в отличие от классического трехфазного асинхронного двигателя в пазу статора двухобмоточной машины располагаются высоковольтная и низковольтная обмотки. Однако подобное заполнение паза статора имеет и свои минусы. В первую очередь, технологически не всегда возможно спроектировать машину с числом параллельных ветвей a=1, а при соединении фаз обмоток в параллели, помимо возможного снижения энергетических показателей, существует риск возникновения блуждающих токов в контуре одной обмотки под действием другой. Такие токи появляются вследствие наведения ЭДС, прежде всего, при работе высоковольтной обмотки на низковольтную. Дополнительную трудность вносит тот факт, что вследствие разнополюсности обмоток, насыщения стали и иных факторов это токи повышенной частоты и несинусоидальной формы. Очень важно, чтобы такие токи не вызывали существенного дополнительного перегрева, пробоя изоляции и возникновения вибраций.

2. Автоматизация расчета воздухоохладителя

При работе любой электрической машины неизбежно возникновение потерь вследствие различных факторов. На рис. 1 приведена схема, классифицирующая различные потери в машине.



 $Puc.\ 1$ – Классификация потерь, возникающих в электрической машине $Fig.\ 1$ – Classification of losses occurring in an electrical machine

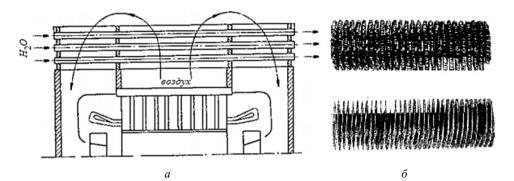
Более детально данное явление рассмотрено во многих общеобразовательных учебниках по электротехнике, электромеханике и электроприводу, однако любые виды потерь рассеиваются в виде тепла. Это подразумевает проектирование кана-

лов отвода создаваемого тепла в активном ядре электрической машины. Данную задачу решают путем проведения вентиляционного и теплового расчета при проектировании электрической машины. Наличие же двух независимых обмоток в статоре может несколько усложнить данную задачу вследствие наведения ЭДС в одной обмотке под действием электромагнитного поля от тока, протекающего в другой.

Критерий расчета охлаждающей системы проектируемой электрической машины – допустимый нагрев (перегрев) активных частей электродвигателя. Из [11] известно, что в случае если нагрев не укладывается в допустимые значения, необходимо внести коррективы в формирование трактов системы охлаждения и произвести перерасчет. Конструктивные особенности электрических машин позволяют отвести излишнее тепло, возникающее вследствие различных потерь, проходящим воздухом через проектируемые аксиальные и радиальные каналы в статоре и роторе, а также за счет проводящих хладагент каналов в обмотке статора. Таким образом, возникающая при вращении ротора сила тяги позволяет воздуху свободно как циркулировать внутри электрической машины (при замкнутом цикле вентиляции), так и проходить сквозь нее (при разомкнутом цикле).

Также зачастую на вал ротора крепится вентилятор, который обеспечивает как нагнетательную (на входе охлаждающего воздуха), так и вытяжную (на выходе) систему вентиляции. Это увеличивает вентиляционные потери, однако позволяет эффективнее отвести тепло, выделенное в элементах электрической машины в виде потерь, приведенных в схеме на рис. 1. Кроме того, вентилятор на роторе может обеспечивать также и внешнее охлаждение машины, что вкупе с оребрением корпуса (увеличением теплоотводящей поверхности) эффективнее позволяет отводить тепло во внешнюю среду с электродвигателей малых мощностей и размеров.

Для крупных электрических машин отвод тепла за счет внешней среды предусмотрен лишь для разомкнутого цикла вентиляции. При замкнутом цикле применяются специальные устройства, встраиваемые в конструкцию электрической машины — газо- или в частности воздухоохладители. На рис. 2 приведено схематичное изображение воздухоохладителя, поясняющее принцип его работы.



 $Puc.\ 2$ — Принцип работы воздухоохладителя: a — схема устройства; δ — трубки воздухоохладителя $Fig.\ 2$ — Air cooler operating principle: a — device diagram; b — air cooler pipes

Место расположения воздухоохладителя разделено на три камеры. В центральную камеру из активного ядра электрической машины поступает нагретый воздух, проходит вдоль охлаждающих трубок воздухоохладителя и уходит через две крайние камеры на следующий цикл охлаждения (рис. 2, *a*). Для увеличения площади

теплоотдачи трубки охладителя делаются оребренными. В настоящее время применяются трубки с проволочным оребрением (рис. 2, δ , сверху), а также цельнокатаные (рис. 2, δ , снизу). Достоинства и недостатки таких трубок подробно рассмотрены в [12].

Корректность выбора данного устройства для охлаждения той или иной электрической машины обусловлена различными технико-экономическими показателями: потерями давления в теплообменнике, запасом поверхности теплопередачи, рабочим давлением, толщиной и материалом применяемого оребрения на трубках, а также коэффициентом теплопередачи. Излишний запас параметров воздухоохладителя, применяемого для конкретной машины, приводит не только к удорожанию производства охладителя, но и к косвенным негативным последствиям.

В случае чрезмерно высокого коэффициента теплопередачи количество трубок будет уменьшено, что повысит скорость протекания хладагента в нем и несколько удешевит устройство. Однако при высокой скорости протекания воды в трубках возрастает скорость образования солей металлов (магния, кальция) в теплообменнике. То есть это отразится на стоимости дальнейшего обслуживания охладителя, что будет выражено в необходимости более частой прочистки труб от солей и более быстрому выходу охлаждающего устройства из строя, соответственно, к дальнейшей вынужденной замене воздухоохладителя.

Искомой величиной при расчете коэффициента теплопередачи является запас теплопередачи воздухоохладителя. Нахождение данного параметра обусловливается необходимостью корректного выбора теплообменника при проектировании системы вентиляции электрической машины. Запас теплопередачи — это соотношение коэффициента теплопередачи K и величины тепловой нагрузки охладителя K_1 , кВт/(м² · K), отображающее количественную характеристику дополнительной способности теплоотвода воздухоохладителя по отношению к номинальной величине отводимой теплоты в процентном соотношении. В производстве, исходя из паспортных требований, необходимо оптимальное соотношение данных величин. На практике достаточным запасом является соотношение $K = (0.85...0.90)K_1$, однако в некоторых случаях с целью удешевления допустимы также соотношения вплоть до $K = (0.97...0.99)K_1$.

Существуют эмпирические зависимости коэффициента $K(v_a,v_w)$ для применяемых на производстве пучков трубок различных марок. В рассматриваемой работе исследованы воздухоохладители с применением трубок ТЭМЗ-26 (производства Троицкого электромеханического завода) и КВСП (производства завода «Металл-ЭкспортПром»), с полученными зависимостями $K(v_a,v_w)$ в диапазоне скорости движения воздуха через ряды трубок охладителя от 1,4 до 7 м/с для $v_w = 0.5$; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 м/с в двигателях мощностью более 1000 кВт. В менее мощных и тихоходных электрических машинах скорость набегающего воздуха ниже исследованного диапазона, поэтому для таких двигателей необходимо проводить интерполяцию графиков, что сказывается на точности определения коэффициента теплопередачи, соответственно, и на искомом параметре — запасе теплопередачи [6].

Повышение точности расчетов, связанных с указанной выше ситуацией для маломощных тихоходных двигателей, а также снижение трудозатрат возможно путем создания новой математической модели расчета запаса теплопередачи воздухоохладителя для любых значений скоростей как воды, так и воздуха. Для этого необходимо найти значение коэффициента для всех случаев $K(0, v_w)$, после чего приступать к получению аналитических выражений.

3. Анализ численного моделирования двигателя

Как было отмечено ранее, в некоторых случаях инженеры-конструкторы вынуждены распараллеливать ветви в машине. При наличии параллельных ветвей создается контур (при a=2 – один на фазу, a=3 – два, и так далее), в котором вследствие наводимой ЭДС, содержащей паразитные гармоники, начинает протекать ток повышенной частоты и несинусоидальной формы, что приводит к дополнительному нагреву и к повышенной вибрации ротора.

Здесь и далее a_h — число параллельных ветвей высоковольтной обмотки, a_l — число параллельных ветвей низковольтной обмотки.

Исследуется разрабатываемый вертикальный асинхронный двухобмоточный двигатель АВЦ-4500/300-10000/380-8/32У5 со следующими параметрами: номинальные мощности $P_{\text{ном}}=4500/300$ кВт; номинальные напряжения $U_{\text{ном}}=10~000/380$ В; синхронные частоты вращения магнитного поля статора $n_{\text{ном}}=750/187,5$ об/мин; сетевая частота $f_1=50$ Гц; длина воздушного зазора $l_{\delta}=1.25$ м.

Во избежание вышеописанных последствий из-за возникновения блуждающих токов в контурах параллельных обмоток необходимо выбрать правильное соотношение a_h и a_1 .

Для верификации данных в программной среде ANSYS были построены численные модели уже имеющихся двухскоростных асинхронных машин производства НПО «ЭЛСИБ» ПАО: ABЦ-5000/115-6000/380-6/24УХЛ4, применяющаяся для нужд Белоярской АЭС, Россия (мощности 5000/115 кВт, напряжения 6000/380 В, сетевая частота 50 Γ ц, синхронные скорости вращения 1000/250 об/мин, $a_l = 1$), а также 2АДР-С-1250/160-6000/380-8/16УХЛ4 (мощности 1250/160 кВт, напряжения 6000/380 В, сетевая частота 50 Гц, синхронные скорости вращения 750/500 об/мин, $a_l = 2$). Кроме того, опытный образец машины ABЦ-5000/115-6000/380-6/24УХЛ4 с $a_l = 2$ выявил существенную вибрацию ротора при выходе на номинальный режим работы двигателя. Результаты численного моделирования опытного образца двигателя отразили это явление, тем самым доказав электромагнитную природу вибрации: амплитуда электромагнитного момента машины с $a_l = 2$ в 10 раз превосходит амплитуду электромагнитного момента машины с $a_l = 1$ в установившемся режиме (рис. 3, 4). Подобные колебания момента, вызванные возникающими вследствие наводимой ЭДС в параллельных ветвях токами, приводят к вибрации ротора.

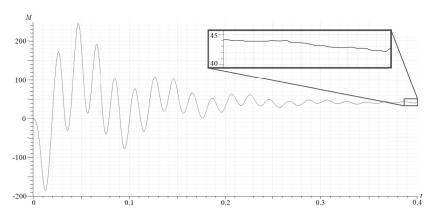
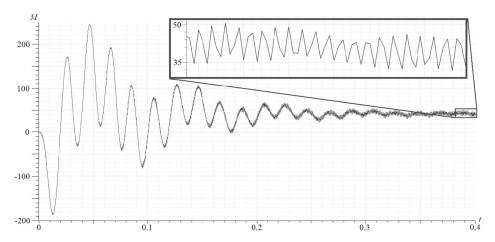


Рис. 3 – График зависимости электромагнитного момента двигателя M, кН · м, от времени t, с, при $a_l = 1$

Fig. 3 – Plot of electromagnetic torque M, kN · m, versus time t, s, for $a_l = 1$

Значения межфазного напряжения на низковольтной обмотке при работе высоковольтной, полученные в результате опыта при проведении испытаний, а также расчетные, полученные в результате численного моделирования, сведены в табл. 1. Расхождение по напряжению не превышает $10\,\%$ (по току $-\,11\,\%$), что приемлемо для оценочного инженерного расчета.



Puc. 4 – График зависимости электромагнитного момента двигателя M, к $\mathbf{H} \cdot \mathbf{m}$, от времени t, \mathbf{c} , при $a_l = 2$

Fig. 4 – Plot of electromagnetic torque M, kN · m, versus time t, s, for $a_{i} = 2$

Таблица 1 / Table 1

Сравнение опытных и расчетных значений токов и напряжений

Comparison of experimental and calculated values of currents and voltages

| Машина | Опытное значение межфазного напряжения U , В | Опытное значение номинального тока I , A | Расчетное значение межфазного напряжения U , В | Расчетное значение номинального тока I , A |
|---------------------------------------|--|--|--|--|
| АВЦ-5000/115- 6000/380-6/24УХЛ4 | 2,0 | 587 | 1,8 | 523 |
| 2АДР-С-1250/160- 6000/380-8/16УХЛ4 | 40,2 | 163 | 37,9 | 149 |

В реальном производстве необходимо также учесть, что в процессе эксплуатации может произойти несимметрия параллелей, в результате чего в контурах наведутся уравнительные токи. На практике это означает необходимость получения расчетных данных с неким запасом по величинам токов и напряжений.

В общем случае при числе витков в фазе

$$w = \frac{S_p \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m},$$

где S_p — число эффективных проводников в пазу статора; Z_1 — число зубцов статора; a — число параллельных ветвей; m — число фаз, необходимо учесть измене-

ние S_p при изменении a, так как, в конечном счете, это влияет на значение линейной нагрузки

$$A = \frac{2 \cdot I_{\rm H} \cdot w \cdot m}{\pi \cdot D} \,,$$

где $I_{\rm H}$ — номинальный ток; D — диаметр расточки статора.

Нагрузка на валу ротора составляет $0.9\,M_{\rm H}\,$ ($M_{\rm H}\,$ — номинальный вращающий момент). В программной среде ANSYS проведен опыт численного моделирования работы исследуемого двигателя в установившемся режиме для $a_l=4$ и $a_l=2$ (при этом $a_h=2$). По его результатам было выявлено, что наводимые ток и напряжение имеют пульсирующую форму. Пренебрегая влиянием паразитных гармоник, полученную форму напряжения u(t) для обоих случаев ($a_l=4$ и $a_l=2$) можно выразить путем аппроксимации в виде формулы

$$u(t) = A_u \sin(\omega t) \sin(32\omega t);$$

форма тока i(t) при $a_l = 4$:

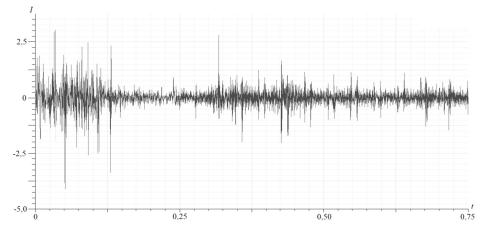
$$i(t) = A_i \sin(\omega t) \sin(32\omega t),$$

где A_u — амплитуда напряжения; A_i — амплитуда тока; t — время, c; ω — круговая частота тока/напряжения, Γ ц,

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$
,

где f – частота тока/напряжения, Γ ц; промышленная частота f = 50 Γ ц.

При $a_l = 2$ форма не описывается формулой I_{A-1} работы исследуемого двигателя в установившемся режиме (рис. 5).



Puc. 5 – График зависимости тока I_{A-1} , A, от времени t, c, при $a_l = 2$ *Fig.* 5 – Plot of current I_{A-1} , A, versus time t, s, for $a_l = 2$

Подставляя функции i(t) и u(t) в формулу определения среднеквадратичного значения функции, известную из [13], получим

$$F(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left[\sin(\omega t) \sin(32\omega t) \right]^{2} dt} ,$$

где F(t) – функция от времени; T – период, c,

$$T = \frac{1}{f}$$
.

Для промышленной частоты период $T = 1/50 \, \Gamma \text{ц} = 0.02 \, \text{с}$.

Из полученных путем численного моделирования данных можно выделить величины несущей $f_{\rm Hec}$ и модулированной $f_{\rm Mog}$ частот (синусоид) тока и напряжения:

$$f_{
m Hec} = rac{\omega}{2\pi} = 50 \; \Gamma {
m II} \; , \qquad f_{
m MOJ} = rac{32\omega}{2\pi} = 1600 \; \Gamma {
m II} \; .$$

Результаты численного моделирования для $a_l=4$ и $a_l=2$ приведены в табл. 2; индексы A-n, B-n, C-n — фазы двигателя, где n — номер параллельной ветви; для $a_l=2$: n=1 и n=2-n=1, n=3 и n=4-n=2; индексы A, B, C — фазы двигателя (от соединительных клемм до узлов распараллеливания ветвей); индексы AB, BC, AC — для обозначения межфазного напряжения между соответствующими фазами.

 Таблица 2 / Table 2

 Сравнение токов и напряжений двигателя АВЦ-4500/300-10000/380-8/32У5

 с различным числом параллельных ветвей

Comparison of currents and voltages of the motor with a different number of parallel branches

| | $a_l = 4$ | $a_l = 2$ |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|
| S_p | 4 | 2 |
| | I, A | |
| $I_{A-1, 2}$ | 22,8 | 0,267 |
| $I_{A-3, 4}$ | 22,8 | 0,267 |
| $I_{A-1, 2}$ $I_{A-3, 4}$ I_{A} | $3,1\times10^{-3}$ | $4,2\times10^{-3}$ |
| $I_{B-1, 2}$ | 28,1 | 0,248 |
| $I_{B	ext{-}3,4}$ I_{B} | 28,1 | 0,248 |
| I_B | $3,1\times10^{-3}$ | $4,2\times10^{-3}$ |
| $I_{C-1, 2}$ | 27,2 | 0,267 |
| $I_{C-3,4}$ I_{C} | 27,2 | 0,267 |
| I_C | $3,2\times10^{-3}$ | 4,2×10 ⁻³ |
| | U, B | |
| $U_{A-1,2}$ | 13,4 | 13,8 |
| $U_{A-3,4}$ U_A | 13,4 | 13,8 |
| U_A | 20,9 | 13,8 |
| $U_{B	ext{-}1,2}$ | 14,6 | 13,8 |
| $U_{B-3, 4}$ | 14,6 | 13,8 |

| | $a_l = 4$ | $a_l = 2$ |
|---------------------|-----------|-----------|
| U_B | 20,6 | 13,8 |
| $U_{C-1,2}$ | 14,6 | 13,9 |
| U _{C-3, 4} | 14,5 | 13,9 |
| U_C | 10,1 | 13,9 |
| U_{AB} | 17,6 | 23,9 |
| U_{BC} | 17,9 | 24,0 |
| U_{AC} | 18,3 | 24,0 |

Окончание табл. 2 / The End of Table 2

Величину амплитуды можно вынести за знак радикала, тогда AF(t) – искомая величина.

Для верификации данных результаты численного моделирования сравнены с математическим описанием формы тока для всех значений I_{A-n} :

$$I_{A-n}(t) = 45 \sqrt{\frac{1}{0.02}} \int_{0}^{0.02} \left[\sin(50 \cdot 2\pi \cdot t) \sin(32 \cdot 50 \cdot 2\pi \cdot t) \right]^{2} dt = 22.5 \text{ A}.$$

Погрешность результатов опытных данных в большую сторону по сравнению с аналитическими объясняется неидеальной формой токов и напряжений вследствие воздействия паразитных гармоник; для остальных фаз результаты аналогичны.

Исходя из полученных путем численного моделирования графиков крутящего момента ротора M(t), можно прийти к выводу, что в обоих случаях вибрация незначительна. Также отсутствует значительное влияние паразитных гармоник на моментную характеристику, способных вызвать ее провал. Однако величины токов для $a_l=4$ приведут к дополнительному нагреву низковольтной обмотки машины, т. е. к потерям в энергетических показателях. Это видно из результатов исследования величин электрических потерь, возникающих в работающей высоковольтной обмотке $p(I_h)$ и неработающей низковольтной $p(i_l)$, сведенных в табл. 3.

Tаблица 3 / Table 3 Количественные значения электрических потерь в обмотках двигателя (a_l = 4) Quantitative values of energy losses in the motor windings (a_l = 4)

| | 0,25Р _н | 0,50Рн | 0,75Р _н | 1,00P _н | 1,25P _н |
|----------------|--------------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $p(I_h)$, кВт | 2,7 | 5,6 | 10,0 | 17,3 | 28,2 |
| $p(i_l)$, BT | 47,2 | 51,1 | 63,6 | 75,2 | 101 |

Несмотря на разницу в два порядка, подобные дополнительные потери помимо дополнительного источника тепла необоснованно приводят к снижению КПД на 0,10...0,12~%, что при сегодняшней погоне за энергоэффективностью электрических машин может оказаться существенной величиной. Кроме того, большее количество контуров повышает вероятность возникновения уравнительных токов в обмотке при возникновении нештатной или аварийной ситуации при эксплуатации машины. Поэтому после предварительного анализа влияния числа параллельных ветвей на работу машины для дальнейших расчетов и исследований принят вариант с $a_l = 2$.

Далее были рассмотрены следующие модификации разрабатываемого двигателя.

- 1. Начальный вариант.
- 2. Изменено расположение обмоток в статоре. В первом варианте низковольтная обмотка была уложена на дно паза, высоковольтная ближе к расточке статора. Такой вариант существенно снижает наводимую ЭДС в низковольтной обмотке при работе высоковольтной (особенно при пуске), однако сильно влияет на энергетические показатели двигателя при работе низковольтной обмотки вследствие увеличения длины магнитных линий. Численное моделирование показало, что при размещении высоковольтной обмотки на дно паза, а низковольтной ближе к расточке статора наводимая в низковольтной обмотке ЭДС не вызывает появления критических величин токов и напряжений в ее контурах, в то же время незначительно сказывается на энергетических параметрах двигателя при работе высоковольтной обмотки (КПД уменьшен на 0,06 %, коэффициент мощности упал на 0,008 о. е.).
- 3. С целью снижения температур элементов активного ядра машины и повышения энергетических показателей длина воздушного зазора l_{δ} была увеличена с 1,25 до 1,45 м. Это не привело к существенному увеличению вибрации ротора, однако величина протекающих в низковольтной обмотке токов при работе высоковольтной двукратно возросла; величина наводимого напряжения была незначительно (на несколько процентов) увеличена, что в дальнейшем отражено в сводной таблице. Кроме того, была изменена конфигурация аксиальных каналов ротора.
- 4. Необходимо отметить, что в течение всего численного эксперимента число параллельных ветвей высоковольтной обмотки $a_h = 2$. Было проведено исследование величин наводимых токов и напряжений в высоковольтной обмотке при работе низковольтной (вследствие большой величины протекающего тока в работающей низковольтной обмотке, порядка $1~{\rm KA}$, притом, что в работающей высоковольтной обмотке величина тока в три раза ниже). Исследование показало, что наводимые в высоковольтной обмотке токи и напряжения несущественны.
- 5. Также исследована модификация двигателя при отсутствии контуров в низковольтной обмотке ($a_l=1$). Вследствие того, что для низковольтной обмотки при $a_l=2$ число эффективных проводников в пазу статора $S_p=2$, было принято решение применить однослойную волновую обмотку с эквивалентным шагом y=4,5 (возможность рассмотрения данного варианта обусловлена синусоидальностью возникающей МДС однослойной низковольтной обмотки). Однако данное решение подразумевает пропуск пазов при намотке, что сказывается на энергетических показателях машины. Кроме того, это существенно затрудняет проведение электромагнитного расчета классическим способом, тем самым не позволяя дать адекватную предварительную оценку энергетическим параметрам проектируемого двигателя. Вследствие означенных аргументов данный вариант к рассмотрению принят не был.

Значения токов и напряжений для всех вышерассмотренных модификаций двигателя сведены в табл. 4.

Исходя из полученных результатов численного моделирования, к последующему проектированию выбран вариант двигателя в модификациях 3 и 4. Посредством численного моделирования в программной среде ANSYS исследованы наводимые токи и напряжения при крайних режимах работы (холостой ход и короткое замыкание) обеих обмоток: их величины изменяются соразмерно с величинами токов и напряжений при пуске и при холостом ходе. При этом пиковые значения наводи-

мых токов наблюдаются при скольжениях s = 1,0...0,7 о. е., в то время как напряжений — при скольжениях s = 0,45...0,15 о. е. Величина пиковых значений не превышает 5...7-кратных номинальных, что допустимо согласно [14].

Таблица 4 / Table 4

Сравнение токов и напряжений различных модификаций двигателя

АВЦ-4500/300-10000/380-8/32У5

Comparison of currents and voltages of the AVTS motor various modifications

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--|
| Модификация | $a_l = 2$ | | | $a_h = 2$ | | |
| S_p | $u_l - z$ | | | $\frac{u_h}{1}$ | | |
| S_p | | <i>I</i> , <i>I</i> | | | 1 | |
| I_{A-1} | 0,267 | 0,428 | 0,919 | 0,087 | 0,069 | |
| I_{A-2} | 0,267 | 0,428 | 0,919 | 0,087 | 0,069 | |
| I_A | $4,2\times10^{-3}$ | $4,1\times10^{-3}$ | $4,5\times10^{-3}$ | $5,2\times10^{-3}$ | $9,2\times10^{-3}$ | |
| I_{B-1} | 0,248 | 0,405 | 0,910 | 0,090 | 0,076 | |
| I_{B-2} | 0,248 | 0,405 | 0,910 | 0,090 | 0,076 | |
| I_B | $4,2\times10^{-3}$ | $4,1\times10^{-3}$ | $4,5\times10^{-3}$ | $5,3\times10^{-3}$ | 9,5×10 ⁻³ | |
| I_{C-1} | 0,267 | 0,417 | 0,902 | 0,081 | 0,070 | |
| I _{C-2} | 0,267 | 0,417 | 0,902 | 0,081 | 0,070 | |
| I_C | $4,2\times10^{-3}$ | $4,2\times10^{-3}$ | $4,6\times10^{-3}$ | $5,2\times10^{-3}$ | $9,3\times10^{-3}$ | |
| | U, B | | | | | |
| U_{A-1} | 13,8 | 13,7 | 15,0 | 59,8 | 73,4 | |
| U_{A-2} | 13,8 | 13,7 | 15,0 | 59,8 | 73,4 | |
| U_A | 13,8 | 13,7 | 15,0 | 29,9 | 53,1 | |
| U_{B-1} | 13,8 | 13,8 | 15,0 | 59,4 | 73,6 | |
| U_{B-2} | 13,8 | 13,8 | 15,0 | 59,4 | 73,6 | |
| U_B | 13,8 | 13,8 | 15,0 | 30,6 | 54,8 | |
| U_{C-1} | 13,9 | 13,9 | 15,3 | 59,8 | 74,2 | |
| U_{C-2} | 13,9 | 13,9 | 15,3 | 59,8 | 74,2 | |
| U_C | 13,9 | 13,9 | 15,3 | 29,9 | 55,1 | |
| U_{AB} | 23,9 | 23,8 | 25,9 | 30,3 | 53,9 | |
| U_{BC} | 24,0 | 24,0 | 26,3 | 30,5 | 54,7 | |
| U_{AC} | 24,0 | 23,9 | 26,3 | 29,9 | 53,1 | |

Для выбранного варианта путем численного моделирования были исследованы величины электрических потерь, возникающих в работающей высоковольтной обмотке $p(I_h)$ и неработающей низковольтной $p(i_l)$, и в работающей низковольтной обмотке $p(I_l)$ и неработающей высоковольтной $p(i_h)$ при различных значениях потребляемой мощности. Результаты исследования показали, что электрические потери, возникающие в одной обмотке, под действием наводимой ЭДС вследствие работы другой, незначительны (разница в шесть-семь порядков, что существенно ниже по сравнению с предыдущим опытным образцом двигателя, взятым за основу), поэтому в дальнейшем при проектировании воздухоохладителя данными потерями можно пренебречь. Количественные величины потерь сведены в табл. 5.

| Таблица 5 / Table 5 |
|---|
| Количественные значения электрических потерь в обмотках двигателя $(a_l = 2)$ |
| Quantitative values of energy losses in the motor windings $(a_l = 2)$ |

| | 0,25Р _н | 0,50Р _н | 0,75Р _н | 1,00P _н | 1,25Р _н |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $p(I_h)$, кВт | 2,5 | 5,0 | 9,2 | 16,5 | 26,0 |
| $p(i_l)$, мВт | 45 | 47 | 54 | 64 | 98 |
| $p(I_l)$, кВт | 52 | 57 | 66 | 77 | 104 |
| $p(i_h)$, мВт | 0,89 | 0,91 | 0,95 | 1,30 | 1,80 |

4. Математическое моделирование при проектировании воздухоохладителя

Для общего аналитического описания графиков, полученных эмпирическим путем, при расчете коэффициента $K(v_a, v_w)$ необходимо понять, какое значение имеет каждый из них в точке $K(0, v_w)$. Подобная ситуация практически невозможна, поэтому для нахождения искомых величин имеет смысл взять за основу расчета общеизвестные эмпирические формулы из [11, 12, 15] и принять характер течения охлаждаемого воздуха как ламинарный, а внутреннюю поверхность трубок – глалкой.

Согласно [15] математическое определение коэффициента теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к трубке, кВт/(м² · K); δ_m — толщина стенки трубки, м; λ_m — коэффициент теплопроводности материала трубки, Вт/(м · K); α_2 — коэффициент теплоотдачи от трубки к холодному теплоносителю, кВт/(м² · K).

По [15] при существенно превалирующей величине $\frac{1}{\alpha_1}$ остальными слагаемыми можно пренебречь. Тогда по [15]:

$$\begin{split} K &\approx \alpha_1; \\ \alpha_1 &= \frac{\lambda}{D_1} \operatorname{Nu}_a; \\ K &\approx \frac{\lambda}{D_1} \operatorname{Nu}_a; \\ \operatorname{Nu}_a &= \xi \operatorname{Re}_a \operatorname{Pr}_a \left[40 \sqrt{\xi_a} \left(\operatorname{Pr}_a^{2/3} - 1 \right) + 8 \right]^{-1} \end{split}$$

где Nu_a — критерий (число) Нуссельта для воздуха; λ — коэффициент теплопроводности воздуха, $\mathrm{Br}/(\mathrm{M}\cdot\mathrm{K})$; D_l — внешний диаметр трубок, м; ξ_a — коэффициент сопротивления трения [11],

$$\xi_a = \frac{0.316}{\text{Re}_a^{1/4}};$$

 Re_a – критерий Рейнольдса для воздуха [11],

$$Re_a = \frac{v_a d}{v}$$
;

 Pr_a – критерий Прандтля для воздуха [11],

$$Pr_a = \frac{vc\rho}{\lambda}$$
.

В вышеприведенных формулах: d – внешний диаметр трубок, м; v – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг · K); ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Учитывая, что при скорости воздуха $v_a=0$ критерий $\mathrm{Re}_a=0$, то соответственно $K(0,v_w)=0$. Отсюда зависимости $K(v_a,v_w)$, приведенные в виде эмпирических графиков в инструкциях по эксплуатации поставляемых воздухоохладителей, можно описать общей формулой

$$K(\mathbf{v}_a, \mathbf{v}_w) = x \mathbf{v}_a^y, \tag{*}$$

где

$$\begin{cases} x = \frac{x_1}{v_w} + x_2 + x_3 v_w; \\ y = y_1 v_w^2 + y_2 v_w + y_3. \end{cases}$$

Для получения коэффициентов x_{1-3} была составлена система из трех уравнений вида

$$x = x_1 v_w^{-1} + x_2 + x_3 v_w$$

с тремя неизвестными. Путем построения линий тренда для опытных кривых $K(\nu_a,\nu_w)$ были определены значения x при $\nu_w=0.5,\,1.0,\,3.0$. Коэффициенты y_{1-3} получены аналогичным способом.

Значения коэффициентов для имеющихся типов воздухоохладителей приведены в табл. 6, 7.

Таблица 6 / Table 6

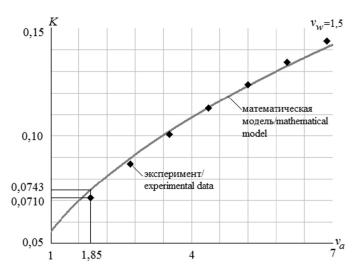
Значения коэффициентов для пучков трубок воздухоохладителя типа ТЭМЗ-26 Values of coefficients for tube bundles of the TEMZ-26 air cooler type

| i | 1 | 2 | 3 |
|-------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| x_i | $-4,20\times10^{-3}$ | $55,6\times10^{-3}$ | $0,65 \times 10^{-3}$ |
| y_i | -0,03 | 0,17 | 0,24 |

Таблица 7 / Table 7
Значения коэффициентов для пучков трубок воздухоохладителя типа КВСП
Values of coefficients for tube bundles of the KVSP air cooler type

| i | 1 | 2 | 3 |
|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| x_i | $-4,44 \times 10^{-3}$ | $56,9 \times 10^{-3}$ | 0.92×10^{-3} |
| y_i | -0,027 | 0,151 | 0,313 |

Полученные формулы верифицированы показателями для других известных эмпирических зависимостей $K(\nu_a,\nu_w)$, расхождение с опытными значениями не превышает величину 5 %, что отображено на рис. 6: показаны экспериментальная и полученная зависимости $K(\nu_a;1,5)$, описываемые (*), для пучка трубок КВСП. В данном случае имеет место максимальное расхождение среди всей группы опытных и смоделированных результатов.



Puc.~6 – Графики зависимости коэффициента теплопередачи K, кВт/(м² · K), от скорости воздуха ν_a , м/с, при ν_w = 1,5 м/с Fig.~6 – Plot of the K, kW/(m² · K) thermal transmission coefficient versus air speed ν_a , m/s, for ν_w = 1,5 m/s

Далее, по формуле из [12]

$$K_1 = \frac{P}{s_a l_{ef} n \Delta t} \,,$$

где P — тепловой поток, кВт; s_a — теплоотводящая поверхность одного погонного метра трубки по воздуху, м²/м; $l_{e\!f}$ — эффективная длина трубки, м; n — число трубок в охладителе, шт.; Δt — среднелогарифмический температурный напор (необходим для определения средней разницы температур сред при прямотоке и противотоке охлаждаемого воздуха и охлаждающей воды; определяется по формулам из [12]), можно определить тепловую нагрузку воздухоохладителя. Формула из [12]

$$N = \left(1 - \frac{K_1}{K}\right) 100 \%$$

позволяет оценить запас теплопередачи N рассчитываемого охладителя (в процентах). Это дает возможность правильно подобрать необходимый воздухоохладитель с учетом ранее указанных критериев.

На основе общеизвестных формул из [12] и полученных результатов математического моделирования в виде общего аналитического описания эмпирических графиков для расчета коэффициента $K(v_a, v_w)$ на языке программирования Java-Script реализован программный продукт, обеспечивающий уменьшение трудоемкости и времени расчета воздухоохладителя. Выбор данного языка программирования подробно описан в [16].

По результатам расчета воздухоохладителя при применении пучков трубок ТЭМЗ-26 запас теплопередачи при работе двигателя от высоковольтной обмотки составляет 11,8 %, при работе низковольтной – 3,26 %; при применении пучков трубок КВСП запас теплопередачи при работе двигателя от высоковольтной обмотки составляет 16,0 %, при работе низковольтной – 3,98 %. Полученные результаты свидетельствуют о предпочтительности применения пучков трубок ТЭМЗ-26 при проектировании воздухоохладителя, исходя из их технико-экономических характеристик, отвечающих вышеописанным критериям.

Заключение

По результатам проведенного численного моделирования оценены возникающие токи и напряжения вследствие наводимой ЭДС в низковольтной обмотке статора при работе высоковольтной (и наоборот) при проектировании двухскоростного двухобмоточного асинхронного электродвигателя с замкнутой системой вентиляции. Рассмотрены различные модификации разрабатываемой машины. Результаты обработки полученного массива данных демонстрируются на примере двигателя АВЦ-4500/300-10000/380-8/32У5.

Автоматизация расчета воздухоохладителя и в частности нахождения коэффициента теплопередачи рассматриваемых пучков трубок типа ТЭМЗ-26 и КВСП обеспечила снижение времени и трудоемкости теплового расчета, в то же время повысив его точность. Реализованный на языке программирования JavaScript программный продукт позволяет оценить запас теплопередачи применяемого воздухоохладителя с учетом дополнительных нагревов, возникающих при взаимном влиянии работающих обмоток статора.

ЛИТЕРАТУРА

- Computer modeling of coupled electromagnetic, temperature and magnetohydrodynamic fields in the induction heating and melting devices / V.B. Demidovich, I.I. Rastvorova, V.N. Timofeev, M.Y.U. Khatsayuk, A.A. Maksimov // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled problems 2017. – Rhodes Island, Greece, 2017. – P. 1042–1049.
- Electromechanical and energetic characteristics of system of induction heating by permanent magnets / A.I. Aliferov, R.A. Bikeev, D.S. Vlasov, V.A. Promzelev, A.E. Morev // The 17 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016: proceedings, Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 518–521.

- 3. **Aliferov A.I., Lupi S.** Skin effect in toroidal conductors with circular cross-section // Compel. 2008. Vol. 27, N 2. P. 408–414.
- Aliferov A.I., Morev A.E., Promzelev V.A. Heating modes study of non-magnetic products in rotating magnetic field of permanent magnets // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – Vladivostok, 2018. – P. 8602564.
- 5. **Шевченко А.А.** Исследование теплового состояния электрических машин при различных режимах работы / науч. рук. 3.С. Темлякова // Материалы 53 Международной научной студенческой конференции (МНСК-2015). Мехатроника и автоматизация, Новосибирск, 11–17 апр. 2015 г. Новосибирск, 2015. С. 94.
- 6. **Шевченко А.А.** Автоматизация оценки теплового состояния воздухоохладителя асинхронного двигателя // Молодежь. Наука. Технологии (МНТК-2017): сборник научных трудов международной научно-технической конференции студентов и молодых ученых: в 4 ч., Новосибирск, 18–20 апр. 2017 г. Новосибирск, 2017. Ч. 3. С. 183–185.
- Heating calculation features at self-start of large asynchronous motor / A.A. Shevchenko, Z.S. Temlyakova, V.V. Grechkin, M.E. Vilberger // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – Art. 032039. – P. 1–6. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032039.
- 8. The asynchronous motor start calculation with the motor soft starter / A.A. Shevchenko, Z.S. Temlyakova, V.V. Grechkin, A.A. Temlyakov // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018): труды XIV международной конференции, Новосибирск, Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.: в 8 т. Новосибирск, 2018. Т. 1, ч. 5. С. 410–412
- Lupi S., Forzan M., Aliferov A. Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling: monograph. – Heidelberg: Springer, 2015. – 370 p. – DOI: 10.1007/ 978-3-319-03479-9.
- Шевченко А.А., Темлякова З.С., Гречкин В.В. Автоматизация расчета самозапуска двухскоростных асинхронных машин на основе применения языка программирования JavaScript // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды 7 Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 23–24 нояб. 2016 г. – Новокузнецк, 2016. – С. 219–221.
- 11. **Бухгольц Ю.Г., Тюков В.А., Честюнина Т.А.** Основы аэродинамических и тепловых расчетов в электромеханике. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 194 с.
- 12. **Филиппов И.Ф.** Вопросы охлаждения электрических машин. М.; Л.: Энергия, 1964. 334 с
- 13. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996. – 639 с.
- ГОСТ ІЕС 60034-1–2014. Машины электрические вращающиеся. Ч. 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики. – М.: Стандартинформ, 2015. – 92 с
- 15. **Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И.** Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. М.: Энергия, 1974. 560 с.
- Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S. Large asynchronous machines self-running mode JavaScript-based computer-aided design // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016): proceedings, Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 2. – P. 133–135. – DOI: 10.1109/ifost.2016.7884210.

AUTOMATION OF THE THREE-PHASE DOUBLE-SPEED ASYNCHRONOUS MOTOR DESIGN

Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Toporkov D.M., Temlyakov A.A

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The subject of research is double-speed asynchronous motors of the type produced by SPA ELSIB PJSC with two independent windings in the stator designed to drive the main circulating pumps of nuclear power plants as well as similar mechanisms in other sectors of the national economy.

The article deals with specific issues of the full cycle of calculating the considered electric machine. We propose a method of research on mutual influence of stator windings when the motor works based on the fundamental positions of the theory of electrical machines using numerical modeling. Also, a method of choosing an air cooler to be used in thermal calculation taking into account the features of the machine type under investigation is proposed. The research purpose is to optimize the full cycle of calculating a new motor of this type under development. This is due to the occurrence of additional heating in one stator winding due to the operation of the other, which increases labor costs caused by the need to take into account an additional heat source during thermal calculation. In addition, the existing empirical dependencies do not fully reflect the entire physical picture of the ongoing processes. The originality of the research lies in the fact that based on the known provisions the algorithm for calculating the applied air cooler has been modified due to automation, which contributes to correct protection against thermal overheating effects. It is shown that by numerical modeling it is possible to minimize labor costs for determining the parameters taken into account in the subsequent thermal calculation that arise as a result of the mutual influence of the selected machine type stator windings. The research results are tried out in SPA ELSIB PJSC manufacture and presented by the motor specific example.

Keywords: multispeed asynchronous motor, numerical modeling, mathematical modeling, electromagnetic vibration, air cooler, JavaScript.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-52-71

REFERENCES

- 1. Demidovich V.B., Rastvorova I.I., Timofeev V.N., Khatsayuk M.Y.U., Maksimov A.A. Computer modeling of coupled electromagnetic, temperature and magnetohydrodynamic fields in the induction heating and melting devices. *Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled problems 2017.* Rhodes Island, Greece, 2017, pp. 1042–1049.
- Aliferov A.I., Bikeev R.A., Vlasov D.S., Promzelev V.A., Morev A.E. Electromechanical and energetic characteristics of system of induction heating by permanent magnets. *The 17 Interna*tional conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016. Proceedings, Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016, pp. 518–521.
- 3. Aliferov A.I., Lupi S. Skin effect in toroidal conductors with circular cross-section. *Compel*, 2008, vol. 27, no. 2, pp. 408–414.
- 4. Aliferov A.I., Morev A.E., Promzelev V.A. Heating modes study of non-magnetic products in rotating magnetic field of permanent magnets. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018*, Vladivostok, 2018, p. 8602564.
- Shevchenko A.A. [Investigation of the thermal state of electric machines under various operating conditions]. *Materialy 53 Mezhdunarodnoi nauchnoi studencheskoi konferentsii (MNSK-2015). Mekhatronika i avtomatizatsiya* [Proceedings of the 53rd International students scientific conference (ISSC-2015). Mechatronics and automation], Novosibirsk, 2015, p. 94. (In Russian).
- Shevchenko A.A. [Automating the estimate of the asynchronous motor air cooler thermal condition]. *Molodezh'. Nauka. Tekhnologii (MNTK-2017)* [Youth. Science. Technologies (MNTK-2017)], Novosibirsk, 18–20 April, 2017, pt. 3, pp. 183–185. (In Russian).
- Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Grechkin V.V., Vilberger M.E. Heating calculation features at self-start of large asynchronous motor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, art. 032039, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032039.
- 8. Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Grechkin V.V., Temlyakov A.A. The asynchronous motor start calculation with the motor soft starter. *14th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)-44894: proceedings.* Novosibirsk, 2018, vol. 1, pt. 5, pp. 410–412.
- 9. Lupi S., Forzan M., Aliferov A. *Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling*. Heidelberg, Springer, 2015. 370 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03479-9.
- 10. Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Grechkin V.V. [Automating the calculation of self-starting two-speed asynchronous machines based on the using JavaScript programming language]. Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennaya elektronika: trudy 7 Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Proceedings of the 7th All-Russian Scientific and Practical

- Conference "Automated electric drive and industrial electronics"]. Novokuznetsk, 2016, pp. 219–221. (In Russian).
- 11. Bukhgol'ts Yu.G., Tyukov V.A., Chestyunina T.A. *Osnovy aerodinamicheskikh i teplovykh raschetov v elektromekhanike* [Fundamentals of aerodynamic and heating calculations in electromechanical engineering]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 194 p.
- 12. Filippov I.F. *Voprosy okhlazhdeniya elektricheskikh mashin* [Cooling issues of electrical machines]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1964. 334 p.
- 13. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Electrical engineering basic theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996. 639 p.
- 14. GOST IEC 60034-1–2014. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya*. Ch. 1. *Nominal'nye znacheniya parametrov i ekspluatatsionnye kharakteristiki* [State Standard IEC 60034-1–2014. Rotating electric machines. Pt. 1. Nominal values of parameters and operational characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 92 p.
- Borisenko A.I., Dan'ko V.G., Yakovlev A.I. Aerodinamika i teploperedacha v elektriche-skikh mashinakh [Aerodynamics and heat-transfer in electrical machines]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 560 p.
- Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S. Large asynchronous machines self-running mode Java-Script-based computer-aided design. 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016). Novosibirsk, 2016, pp. 133–135. DOI: 10.1109/ifost.2016.7884210.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Шевченко Андрей Александрович – родился в 1992 году, аспирант кафедры ЭМ НГТУ. Область научных интересов: автоматизация производственных процессов. Опубликовано более 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: comrade.zed92@gmail.com).

Shevchenko Andrei Alexandrovich (b. 1992) – post-graduate student at the Department of Electromechanics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on automation of production processes. He is the author of more than 10 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia E-mail: comrade.zed92@gmail.com).



Темлякова Зоя Савельевна – родилась в 1949 году, д-р техн. наук, профессор кафедры ЭМ НГТУ. Область научных интересов: электромеханические системы. Опубликовано более 60 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: temlikova@edu.nstu.ru).

Temlyakova Zoya Savelyevna (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), professor in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on electromechanical systems. She is the author of more than 60 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: temlikova@edu.nstu.ru).



Топорков Дмитрий Михайлович – родился в 1988 году, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМ НГТУ. Область научных интересов: вопросы проектирования электрических машин. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: toporkov@corp.nstu.ru).

Toporkov Dmitriy Mikhailovich (b. 1988) – Candidate of Sciences (Eng.), associated professor in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on issues of electrical machines designing. He is the author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia E-mail: toporkov@corp.nstu.ru).



Темляков Антон Александрович – родился в 1997 году, магистрант кафедры ЭМ НГТУ. Область научных интересов: вопросы проектирования электрических машин. Опубликовано более 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: atemlyakovv@yandex.ru).

Temlyakov Anton Aleksandrovich (b. 1997) – graduate student at the Department of Electromechanics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on issues of electrical machines designing. He is the author of more than 10 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: atemlyakovv@yandex.ru).

Статья поступила 13 июня 2020 г. Received June 13, 2020

To Reference:

Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Toporkov D.M., Temlyakov A.A. Avtomatizatsiya proektirovaniya trekhfaznogo dvukhskorostnogo asinkhronnogo dvigatelya [Automation of the three-phase double-speed asynchronous motor design]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 3 (52), pp. 52–71. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-52-71.