

6-15-2020

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL PROCESSES OF TRACTION ASYNCHRONOUS ENGINES FOR DIAGNOSIS AND CONTROL OF THEIR TECHNICAL CONDITION

Nilufar Rabbonaqlonvna Avezova

Physical-technical institute of the academy of sciences of the Republic of Uzbekistan Address: 2B Mavlyanov st., 100084, Tashkent city, Republic of Uzbekistan Phone: +998 93 5368998;

Javharbek Sulton ugli Fayzullayev

Tashkent Railway Engineering Institute Address: 1 Odilhodjaev st., 100167, Tashkent city, Republic of Uzbekistan E-mail: javhar2019@mail.ru, Phone: +998903251116., javhar2019@mail.ru

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ijctcm>



Part of the [Complex Fluids Commons](#), [Controls and Control Theory Commons](#), [Industrial Technology Commons](#), and the [Process Control and Systems Commons](#)

Recommended Citation

Avezova, Nilufar Rabbonaqlonvna and Fayzullayev, Javharbek Sulton ugli (2020) "MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL PROCESSES OF TRACTION ASYNCHRONOUS ENGINES FOR DIAGNOSIS AND CONTROL OF THEIR TECHNICAL CONDITION," *Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2020* : Iss. 2 , Article 5.

DOI: <https://doi.org/10.34920/2020.2.28-36>

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ijctcm/vol2020/iss2/5>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Chemical Technology, Control and Management by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.



ISSN 1815-4840

Himičeskaâ tehnologiâ. Kontrol' i upravlenie

**CHEMICAL TECHNOLOGY.
CONTROL AND MANAGEMENT**2020, №2 (92) pp.28-36. <https://doi.org/10.34920/2020.2.28-36>

International scientific and technical journal

journal homepage: <https://uzjournals.edu.uz/ijctcm/>

Since 2005

UDC 629.42-192(075)

**MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL PROCESSES OF TRACTION
ASYNCHRONOUS ENGINES FOR DIAGNOSIS AND CONTROL OF THEIR TECHNICAL
CONDITION****Avezova Nilufar Rabbanagulovna¹, Fayzullayev Javharbek Sulton ugli²**¹Physical-technical institute of the academy of sciences of the Republic of Uzbekistan

Address: 2B Mavlyanov st., 100084, Tashkent city, Republic of Uzbekistan

Phone: +998 93 5368998;

²Tashkent Railway Engineering Institute

Address: 1 Odilhodjaev st., 100167, Tashkent city, Republic of Uzbekistan

E-mail: javhar2019@mail.ru, Phone: +998903251116.

Abstract: Mathematical models of thermal processes of traction asynchronous motors are developed. A traction asynchronous motor is considered as a thermal system consisting of three bodies (stator winding, stator magnetic core and rotor), which take into account the heat exchange not only between the corresponding bodies, but also the heat exchange between each body and the environment. It is shown that the steady excess of the stator winding temperature of a traction asynchronous motor depends on the multiplicity of the stator winding current, the coefficient of electrical energy loss, and also on the temperature coefficient of the resistance of the winding conductor material. In this case, it is recommended to diagnose and control the technical condition of the traction asynchronous motor by the coefficient of loss of electrical energy and the consumption of the insulation resource of the stator winding.

Keywords: traction induction motor, thermal process, thermal model, mathematical model, diagnostics, electrothermal analogy, current multiplicity, coefficient of electrical energy loss, consumption of insulation resource.

Аннотация: Тортувчи асинхрон мотор ўзаро иссиқлик алмашинувчи учта: статор чулгами, магнит ўтказгич (ферромагнит ўзак) ва ротор чулгами каби жисмлардан ташкил топган иссиқлик тизими сифатида қаралган ҳолат учун жисмларнинг ўзаро ва ҳар бир жисмнинг атроф-муҳит билан иссиқлик алмашинуви ҳисобга олинган ҳолат учун математик моделлари ишлаб чиқилган. Тортувчи асинхрон мотор статор чулгами ҳароратини атроф-муҳит ҳароратига нисбатан ортишининг турғун қиймати мотор токи карралигига, исроф коэффициентига ва чулгам материали қаршилигининг иссиқлик коэффициентига боғлиқ бўлади. Тортувчи асинхрон мотор техник ҳолатини таиҳислаиш ва назорат қилишини электр энергиясининг исроф коэффициентини ва статор чулгами изоляцияси ресурси сарфи бўйича амалга оширилиши тавсия этилган.

Таянч сўзлар: тортувчи асинхрон мотор, иссиқлик жараёни, иссиқлик модели, математик модель, диагностика (таиҳислаиш), электр-иссиқлик ўхшаишлиги, ток карралиги, электр энергиясининг исроф коэффициентини, статор чулгами изоляцияси ресурси сарфи.

Аннотация: Разработаны математические модели тепловых процессов тяговых асинхронных двигателей. Тяговый асинхронный двигатель рассматривается как тепловая система, состоящая из трех тел (обмотка статора, магнитопровод статора и ротор), в которых учтен теплообмен не только между соответствующими телами, но и теплообмен между каждым телом и окружающей средой. Показано, что устанавливается превышение температуры обмотки статора тягового асинхронного двигателя зависит от кратности тока обмотки статора, коэффициента потерь электрической энергии, а также от температурного коэффициента сопротивления материала проводника обмотки. При этом диагностику и контроль технического состояния тягового асинхронного двигателя рекомендуется осуществлять по коэффициенту потерь электрической энергии и расхода ресурса изоляции обмотки статора.

Ключевые слова: тяговый асинхронный двигатель, тепловой процесс, тепловая модель, математическая модель, диагностика, электротепловая аналогия, кратность тока, коэффициент потери электрической энергии, расход ресурса изоляции.

Введение

В настоящее время самым распространенным типом электродвигателей не только на железнодорожном транспорте, но и в других отраслях промышленности, являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. На сегодняшний день на электрифицированных участках железных дорог нашей республики функционируют 49 электровозов переменного тока и на них эксплуатируются 294 тяговых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (ТАД) [1]. Наилучшему использованию этих ТАД препятствует их высокая повреждаемость. Из-за несовершенства их систем функциональной диагностики ежегодно выходят из строя 20-25 % (59-74 шт.) от общего количества установленных ТАД [2]. Поэтому внедрение новых и совершенствование существующих методов и технических средств функциональной диагностики является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования ТАД.

Обмотки статора и изоляция ТАД являются самыми уязвимыми элементами в его конструкции [3]. Поэтому надежность работы ТАД в основном определяется надежностью изоляционной конструкции (изоляции). Перегрузки ТАД из-за особенностей рабочего механизма, связанного с ТАД, пусковые режимы (их продолжительность, частота), отклонения напряжения на зажимах от номинального значения и несимметрия токов в обмотках, пропадание фазы приводят к перегрузке двигателя по току [4]. Перегрузка ТАД по току, повышение температуры окружающей среды, ухудшение работы системы охлаждения приводят к перегреву витковой изоляции обмоток, в результате чего увеличивается ее тепловой износ, снижается сопротивление витковой изоляции, что в конечном итоге приводит к дальнейшему развитию ее локальных дефектов [5]. На снижение сопротивления витковой изоляции оказывают влияние влажность окружающей среды и ее агрессивность [6].

Условия нагрева отдельных частей ТАД различны. Части обмоток, расположенные внутри двигателя, подвергаются большему нагреву. Кроме этого, выделение теплоты зависит от режимов работы ТАД: в нагруженном состоянии, особенно в перегрузках, обмотки нагреваются сильнее, чем магнитопровод (сталь) и тепловая энергия передается от более нагретых обмоток к магнитопроводу, а при холостом ходе направление теплового потока меняется на обратное и происходит передача тепловой энергии от стали к обмоткам [7].

С целью определения диагностических признаков, обоснования параметров диагностирования, контроля и критериев оценки интенсивности процесса повреждения изоляции ТАД в течение его эксплуатации, требуется произвести расчет и анализ тепловых процессов, сопровождающих электромагнитные процессы в ТАД [8]. Кроме того, с помощью теплового расчета можно найти рабочую температуру отдельных частей ТАД для конкретного режима работы и определить характерные точки для установки измерительных средств функциональной диагностики и систем контроля [9]. Составленные математические модели тепловых процессов должны учитывать режимы работы ТАД, так как при переходе двигателя с его основного номинального режима на перегрузочный, происходит неизбежный перегрев их соответствующих частей. Частые повторно-кратковременные режимы работы ТАД также приводят к его нагреванию. Поэтому разработка динамической тепловой модели для данного режима, учитывающей тепловыделение при пуске и остановке ТАД, играет важную роль не только при эксплуатации двигателя, но и при его проектировании [10].

В практике тепловых расчетов и анализа ТАД для решения задачи нагрева широко применяется метод эквивалентных тепловых схем [11, 12]. В соответствии с данным методом, исследуемый двигатель условно разделяется на отдельные тела (элементы), в той или иной степени однородности по функциональному назначению, используемому материалу, условиям выделения потерь и т.п. Точность результата возрастает с увеличением количества выделенных тел в эквивалентной тепловой схеме. Следует отметить, что результаты теплового расчета зависят не только от количества тел, но и от точности определения коэффициента теплоотдачи

с поверхности нагрева, теплопроводности используемых материалов и других факторов, вносящих неопределенность в исходные данные [11].

Одноэлементная тепловая модель является наиболее простой моделью тепловых процессов ТАД, в которой он представляется единым телом [12]. Однако этот подход не оправдывает себя при режимах, когда нагрузка меняется значительно за короткий период времени и определяющей является динамика процесса, а не установившееся значение превышения температуры. При этом результаты расчета теплового процесса в ТАД значительно расходятся с характером фактического нагрева обмотки статора [13]. Кроме того, следует отметить, что такая модель непригодна для случаев, когда скорость вращения ротора ТАД регулируется частотным методом. Здесь основной проблемой является неконтролируемость перегрева роторной цепи при изменении тока намагничивания двигателя на разных скоростях. В таких случаях следует учитывать уменьшение теплоотдачи между статором и ротором, а также в окружающую среду из-за снижения частоты вращения частотно-регулируемого ТАД [14].

В таких случаях целесообразно использовать двухтельную модель (статор и ротор) теплового процесса ТАД [12]. Потери энергии возникают в статоре и роторе ТАД. Кроме электрических потерь в ТАД, имеются механические потери в подшипниковых узлах. Они в данной модели разделяются пополам и прибавляются к потерям статора и ротора. К недостаткам двухтельной модели следует отнести то, что статор, состоящий из магнитопровода и обмоток, рассматривается как единое тело, хотя их нагрев и теплоотдача существенно отличаются друг от друга, а это существенно снижает точность теплового расчета.

Сравнительно точные результаты получаются при разделении тепловой системы ТАД на три тела: обмотка статора, магнитопровод и станина статора и ротор [15]. Здесь кроме статорных и роторных обмоток также важную роль играет магнитопровод статора. Вместе с тем, существующая трехтельная тепловая модель имеет следующий недостаток: в электрических тепловых схемах не учитываются тепловые проводимости и емкости либо между статором и ротором [15], либо между окружающей средой и соответственно статором и ротором [16]. Эти обстоятельства несколько снижают достоверность результатов расчета тепловых процессов ТАД.

В данной статье рассматривается расчет и анализ тепловых процессов ТАД с помощью его трехтельной тепловой модели с учетом тех тепловых емкостей и проводимостей, которые не были учтены в известных работах. Расчет тепловых процессов ТАД существенно упрощается, если пользоваться методом электротепловых аналогий [5].

В расчетах тепловых процессов методом электротепловой аналогии часто в качестве аналога теплового напряжения принимают разность температур между рассматриваемыми точками тепловой цепи, а в качестве теплового тока – тепловой поток в цепи [5]. Однако при такой аналогии произведение теплового потока на тепловое напряжение не имеет размерность мощности (Вт), как это имеет место в электрической цепи.

Поэтому при расчете и анализе тепловых процессов ТАД с помощью электротепловой аналогии мы воспользуемся критериями аналогии и подобия в соответствии с энергоинформационной моделью цепей различной физической природы [17].

Согласно этой модели для цепи любой (механической, электрической, магнитной, гидравлической, тепловой и т.д.) физической природы, произведение тока на напряжение имеет размерность мощности. В частности, в тепловой цепи для того чтобы произведение теплового тока на тепловое напряжение имело размерность мощности, предложено в качестве аналога для теплового тока принять производную по времени от энтропии тепловой системы S_T , т.е.:

$$I_T = \frac{dS_T}{dt}, \text{ Вт/К}, \quad (1)$$

здесь $S_T = (Q_T/\theta_{cp})$; Q_T – количество теплоты в теле при ее средней температуре θ_{cp} . Таким образом, силе теплового тока соответствует количество энтропии, протекающее через любое сечение проводника в единицу времени.

Тепловое напряжение – разность температур между соответствующими точками тепловой цепи:

$$U_T = \theta_2 - \theta_1, \text{ К.} \quad (2)$$

Теперь переходим к непосредственному расчету и анализу теплового процесса ТАД, рассматривая его как тепловую систему, состоящую из трех тел: 1 – обмотка статора; 2 – магнитопровод статора; 3 – ротор (рис.1). Тела 1, 2 и 3 обладают соответствующими тепловыми емкостями C_1 , C_2 и C_3 и связаны между собой тепловыми проводимостями λ_{12} , λ_{23} и λ_{31} , а с окружающей средой – тепловыми проводимостями λ_{10} , λ_{20} и λ_{30} . $\Delta P_1 = \Delta P_{10}(1 + \alpha_\theta \tau_1)$, ΔP_2 и ΔP_3 – потери активной мощности в соответствующих телах 1, 2 и 3, где $\Delta P_{10} = 3I_c^2 R_0$ – потери активной мощности в обмотке статора при температуре, равной температуре окружающей среды; I_c – ток, потребляемый ТАД; $R_{c,0}$ – активное сопротивление обмоток статора при температуре окружающей среды; α_θ – температурный коэффициент сопротивления материала проводников обмотки; τ_1 , τ_2 и τ_3 – превышение температуры соответственно обмотки статора, магнитопровода статора и ротора над температурой окружающей среде.

При расчетах приняты следующие допущения: 1) тепловые емкости и тепловые проводимости не зависят от температуры, т.е. $C_i = const$; $\lambda_{ij} = const$; 2) тепловая емкость окружающей среды равна бесконечности, т.е. $C_{cp} = \infty$; 3) температура окружающей среды постоянна, т.е. $\vartheta_{cp} = const$.

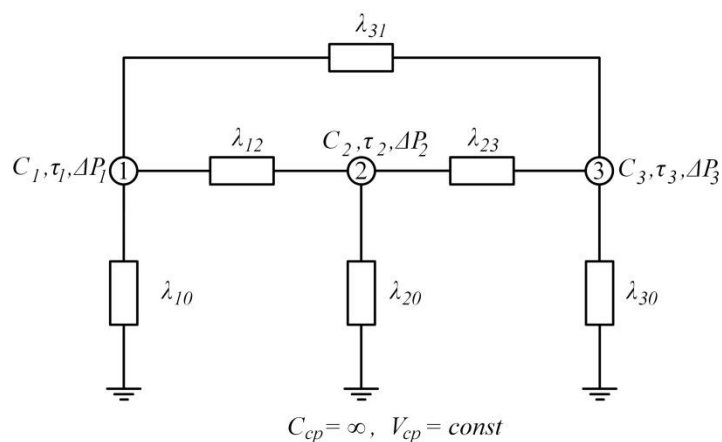


Рис.1. Тепловая схема замещения ТАД как система трех тел.

Составим уравнение теплового баланса для каждого тела – обмотки статора (тело 1), магнитопровода статора (тело 2) и ротора (тело 3):

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \lambda_{10}\tau_1 + \lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) - \lambda_{31}(\tau_3 - \tau_1) = \Delta P_1, \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \lambda_{20}\tau_2 - \lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) + \lambda_{23}(\tau_2 - \tau_3) = \Delta P_2, \\ C_3 \frac{d\tau_3}{dt} + \lambda_{30}\tau_3 + \lambda_{31}(\tau_3 - \tau_1) - \lambda_{23}(\tau_2 - \tau_3) = \Delta P_3. \end{cases} \quad (3)$$

Для выполнения расчетов для системы уравнений (3) требуется определить все параметры тепловой цепи, т.е. тепловые емкости, тепловые проводимости и соответствующие потери.

Тепловые емкости обмотки статора определяется по формуле $C_1 = c_1 m_1$, здесь c_1 – удельная теплоемкость меди; m_1 – масса обмотки статора. Теплоемкость стали найдем как: $C_2 = c_2 m_2 = c_2 \rho_2 \frac{\pi l (D-d)^2}{4}$, где c_2 – удельная теплоемкость материала (стали) магнитопровода; m_2 – масса магнитопровода; ρ_2 – плотность материала магнитопровода; D, d – соответственно внешний и внутренний диаметры статора; l – длина магнитопровода статора. Тепловая емкость ротора определяется как: $C_3 = c_3 (m_{\text{тад}} - m_1 - m_2)$, где $m_{\text{тад}}$ – масса ТАД [18].

Активные потери в обмотке статора находятся по формуле: $\Delta P_1 = \Delta P_{10}(1 + \alpha_\theta \tau_1)$. Потери мощности в магнитопроводе статора определяются как [6]: $\Delta P_2 = k_n p_{1/50} \left(\frac{f_c}{50}\right)^{1,3} B^2 m_2$, где k_n – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока по сечению магнитопровода; $p_{1/50}$ – удельные потери в магнитопроводе при магнитной индукции 1 Тл и частоте сети $f_c = 50$ Гц; B – среднее значение магнитной индукции. Активные потери мощности в роторе состоят из магнитных потерь в магнитопроводе и электрических потерь в его обмотке [6,11]. Последние несколько раз превышают предыдущие. Поэтому магнитными потерями в магнитопроводе при больших значениях скольжений можно пренебречь. В связи с этим потери активной мощности определяются как: $\Delta P_3 = 3I_p^2 R_{p,0}(1 + \alpha_\theta \tau_3)$, где I_p – ток в обмотке ротора; $R_{p,0}$ – активное сопротивление обмоток ротора при температуре окружающей среды.

Расчет значений тепловой проводимости тел между ними на основе обмоточных данных, геометрических размеров, свойств материала статора, ротора и других параметров можно производить в соответствии с методикой расчетов, приведенными в [18], мы их здесь подробно не приводим. После определения параметров по вышеуказанным формулам можно переходить к расчету теплового процесса.

Составим уравнение для аналоговой электрической модели:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + G_{10}\varphi_1 + G_{12}\varphi_{12} - G_{31}\varphi_{31} = I_1, \\ C_2 \frac{d\varphi_2}{dt} + G_{20}\varphi_2 - G_{12}\varphi_{12} + G_{23}\varphi_{23} = I_2, \\ C_3 \frac{d\varphi_3}{dt} + G_{30}\varphi_3 + G_{31}\varphi_{31} - G_{23}\varphi_{23} = I_3, \end{cases} \quad (4)$$

здесь $I_1 = \frac{dS_T}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta P_1 t}{\theta_{cp}} \right) = \frac{\Delta P_1}{\theta_{cp}}$, [Вт/К], $I_2 = \frac{\Delta P_2}{\theta_{cp}}$, [Вт/К] и $I_3 = \frac{\Delta P_3}{\theta_{cp}}$, [Вт/К] – источники тока, направленные к соответствующим узлам электрической модели тепловой системы.

На основании системы уравнений (3) и (4) составим электрическую модель тепловой схемы ТАД как системы трех тел (рис.2).

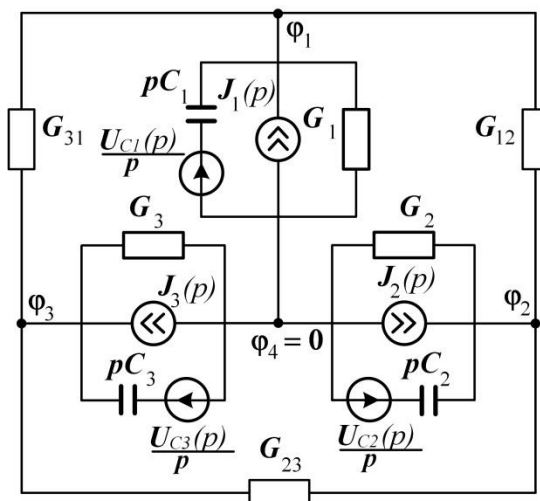


Рис.2. Электрическая модель тепловой схемы ТАД как система трех тел.

Исследуем, как будет меняться напряжение на конденсаторе во времени при скачкообразном изменении токов I_1 , I_2 и I_3 , т.е. произведем расчет переходного процесса. Для этого воспользуемся одним из методов расчета линейных электрических цепей, например методом узловых потенциалов и составим следующую систему уравнений в операторной форме [19]:

$$\begin{cases} Y_{11}(p)\varphi_1(p) - Y_{12}(p)\varphi_2(p) - Y_{13}(p)\varphi_3(p) = J_{11}(p), \\ -Y_{21}(p)\varphi_1(p) + Y_{22}(p)\varphi_2(p) - Y_{23}(p)\varphi_3(p) = J_{22}(p), \\ -Y_{31}(p)\varphi_1(p) - Y_{32}(p)\varphi_2(p) + Y_{33}(p)\varphi_3(p) = J_{33}(p), \end{cases} \quad (5)$$

здесь $Y_{11}(p) = G_1 + G_{12} + G_{31} + pC_1 - \alpha_t \Delta P_{10}$; $Y_{22}(p) = G_2 + G_{12} + G_{23} + pC_2$; $Y_{33}(p) = G_3 + G_{23} + G_{31} + pC_3$ - сумма собственных проводимостей всех ветвей, сходящихся в соответствующих узлах; $Y_{12}(p) = Y_{21}(p) = G_{12}$; $Y_{13}(p) = Y_{31}(p) = G_{31}$; $Y_{23}(p) = Y_{32}(p) = G_{23}$ - общая проводимость между соответствующими узлами; $J_{11}(p) = J_1(p) + U_{C1}(0)C_1$; $J_{22}(p) = J_2(p) + U_{C2}(0)C_2$; $J_{33}(p) = J_3(p) + U_{C3}(0)C_3$ - сумма токов, сходящихся в соответствующих узлах где; $U_{C1}(0)$, $U_{C2}(0)$, $U_{C3}(0)$ - начальные значения напряжений на соответствующих конденсаторах.

Считая, что $U_{C1}(0) = 0$; $U_{C2}(0) = 0$; $U_{C3}(0) = 0$ и $\Delta P_3 = 0$, а также учитывая, что $J_1(p) = \frac{\Delta P_{10}}{p}$, $J_2(p) = \frac{\Delta P_2}{p}$ решим систему уравнений (5) и найдём следующие значения потенциалов узлов в операторной форме:

$$\varphi_1(p) = \frac{a_1 p^2 + b_1 p + c_1}{p(ap^3 + bp^2 + cp + d)} = \frac{H_1(p)}{pH(p)}, \quad (6)$$

$$\varphi_2(p) = \frac{a_2 p^2 + b_2 p + c_2}{p(ap^3 + bp^2 + cp + d)} = \frac{H_2(p)}{pH(p)}, \quad (7)$$

$$\varphi_3(p) = \frac{a_3 p^2 + b_3 p + c_3}{p(ap^3 + bp^2 + cp + d)} = \frac{H_3(p)}{pH(p)}, \quad (8)$$

здесь a , a_1 , a_2 , a_3 , b , b_1 , b_2 , b_3 , c , c_1 , c_2 , c_3 и d - постоянные коэффициенты, зависящие от параметров и потери активной мощности в тепловой цепи (из-за громоздкости их выражений они в статье не приводятся).

С помощью теоремы разложения находим оригиналы выражений (6)-(8) [20]:

$$\varphi_1(t) = \frac{H_1(0)}{H(0)} + \frac{H_1(p_2)}{[pH(p)]'_{p=p_2}} e^{p_2 t} + \frac{H_1(p_3)}{[pH(p)]'_{p=p_3}} e^{p_3 t} + \frac{H_1(p_4)}{[pH(p)]'_{p=p_4}} e^{p_4 t}, \quad (9)$$

$$\varphi_2(t) = \frac{H_2(0)}{H(0)} + \frac{H_2(p_2)}{[pH(p)]'_{p=p_2}} e^{p_2 t} + \frac{H_2(p_3)}{[pH(p)]'_{p=p_3}} e^{p_3 t} + \frac{H_2(p_4)}{[pH(p)]'_{p=p_4}} e^{p_4 t}, \quad (10)$$

$$\varphi_3(t) = \frac{H_3(0)}{H(0)} + \frac{H_3(p_2)}{[pH(p)]'_{p=p_2}} e^{p_2 t} + \frac{H_3(p_3)}{[pH(p)]'_{p=p_3}} e^{p_3 t} + \frac{H_3(p_4)}{[pH(p)]'_{p=p_4}} e^{p_4 t}, \quad (11)$$

здесь $p_1 = 0$; p_2 ; p_3 ; p_4 - корни характеристического уравнения $pH(p) = 0$; $H(0) = [pH(p)]'_{p=0}$; $\varphi_{1т} = \frac{H_1(0)}{H'(0)}$, $\varphi_{2т} = \frac{H_2(0)}{H'(0)}$, $\varphi_{3т} = \frac{H_3(0)}{H'(0)}$ - значения потенциалов соответствующих узлов цепи при установившемся режиме.

Напряжения на конденсаторах находятся как:

$$U_{C1}(t) = -\varphi_1(t), \quad (12)$$

$$U_{C2}(t) = -\varphi_2(t), \quad (13)$$

$$U_{C3}(t) = -\varphi_3(t). \quad (14)$$

Если в уравнение (12) считать, что $t \rightarrow \infty$, то получим формулу установившегося превышения температуры обмотки ТАД:

$$\tau_{1y} = \frac{H_1(0)}{H(0)} = \frac{c_1}{d}. \quad (15)$$

С учетом значения c_1 и d , имеем следующее выражение:

$$\tau_{1y} = \frac{P_{10} + mP_2}{\lambda_3 - \alpha_\theta P_{10}} = \frac{3I^2 R_0 + mP_2}{\lambda_3 - 3\alpha_\theta I^2 R_0}, \quad (16)$$

где $m = B/A$ $\lambda_3 = C/A$ (коэффициенты A , B и C , зависящие от параметров и потери активной мощности в тепловой цепи).

С целью определения λ_3 и m в формуле (16) воспользуемся результатами опыта короткого замыкания (к.з.) ТАД. Согласно этого опыта при $\omega = \omega_n$ $\Delta P_2 = 0$ и $I_c = I_{сн}$ [6], где ω_n и $I_{сн}$ - соответственно номинальные значения частоты вращения ротора и тока статора.

Для режима к.з. формула (16) принимает следующий вид:

$$\tau_{1к.з.} = \frac{3I_H^2 R_0}{\lambda_3 - 3\alpha_\theta I_H^2 R_0}. \quad (17)$$

Из (17) находим:

$$\lambda_3 = \frac{3I_H^2 R_0 (1 + \alpha_\theta \tau_{1к.з.})}{\tau_{1к.з.}}. \quad (18)$$

Подставляя (18) в (17) имеем:

$$\tau_{1у} = \frac{(3I_H^2 R_0 + mP_2)\tau_{1к.з.}}{3I_H^2 R_0 (1 + \alpha_\theta \tau_{1к.з.}) - \tau_{1к.з.} \alpha_\theta 3I_H^2 R_0}. \quad (19)$$

В номинальном режиме работы ТАД $I = I_H$ и $\tau_{1у} = \tau_{1н}$. Для этого режима формула (19) принимает следующий вид:

$$\tau_{1н} = \frac{(3I_H^2 R_0 + mP_2)\tau_{1к.з.}}{3I_H^2 R_0}. \quad (20)$$

Из (20) получаем:

$$m = \frac{3I_H^2 R_0 (\tau_{1н} - \tau_{1к.з.})}{\tau_{1к.з.} P_2}. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (19), имеем следующее выражение:

$$\tau_{1у} = \frac{\tau_{1к.з.} I^2 + (\tau_{1н} + \tau_{1к.з.}) I_H^2}{I_H^2 (1 + \alpha_\theta \tau_{1к.з.}) - \tau_{1к.з.} \alpha_\theta I^2}. \quad (22)$$

При нагрузке ТАД, отличной от номинальной, имеем $I = kI_H$. Подставляя последнее в (22), получим следующее:

$$\tau_{1у} = \frac{\tau_{1н} - \tau_{1к.з.} (1 - k^2)}{1 + \alpha_\theta \tau_{1к.з.} (1 - k^2)}. \quad (23)$$

Полученная формула позволяет рассчитать значение установившегося превышения температуры обмотки в зависимости от кратности тока нагрузки ТАД k по отношению к номинальному с учетом влияния изменения сопротивления (через коэффициент α_θ) обмотки при нагревании.

Значения $\tau_{1к.з.}$ можно найти по паспортным данным ТАД [1]. Действительно, в нормальном режиме работы ТАД превышение температуры обмотки также будет номинальным и может быть определено по следующему выражению:

$$\tau_{1н} = \frac{\Delta P_{сн} + \Delta P_{мн}}{A}, \quad (24)$$

где $\Delta P_{сн}$, $\Delta P_{мн}$ – номинальные потери активной мощности соответственно в магнитопроводе (стали) и в меди обмотки ТАД, Вт; $[A]$ – эквивалентная теплоотдача обмотки, [Джл/(с · °С)].

В режиме к.з. уравнение (24) принимает следующий вид:

$$\tau_{1к.з.} = \frac{\Delta P_{мн}}{A}. \quad (25)$$

Совместное решение уравнений (24) и (25) дает следующее решение:

$$\tau_{1к.з.} = \frac{\tau_{1н}}{1 + a}, \quad (26)$$

здесь $a_{к.з.} = \Delta P_{сн} / \Delta P_{мн}$ – коэффициент потери.

Подставляя (26) в (23), окончательно получим следующее выражение установившегося превышения температуры обмотки:

$$\tau_{1у} = \tau_{1н} \frac{a_{к.з.} + k^2}{1 + a_{к.з.} + \alpha_\theta \tau_{1н} (1 - k^2)}. \quad (27)$$

Последнее уравнение показывает, что установившееся превышение температуры обмотки статора ТАД зависит от кратности тока обмотки статора k , коэффициента потерь a и температурного коэффициента сопротивления материала проводника обмотки α_θ .

Если заменить реальную кривую нагрева обмотки статора ТАД на эквивалентную кривую, то можно получить следующее уравнение нагрева обмотки:

$$\tau = \tau_{нач.} e^{-\frac{t}{T_{эkv}}} + \tau_{1у} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{эkv}}} \right), \quad (28)$$

здесь $\tau_{нач.}$ – начальное значение превышения температуры обмотки статора, °С; $T_{эkv}$ – эквивалентная постоянная времени нагрева ТАД, с; t – текущее значение времени, с.

Значение $T_{\text{экв.}}$ может быть найдено по следующей формуле [5]:

$$T_{\text{экв.}} = \frac{\sum_1^n C_i \tau_{iH}}{\Delta P_H}, \quad (29)$$

здесь C_i , τ_{iH} – соответственно тепловая емкость и номинальное превышение температуры i -го тела (обмотки статора, магнитопровод статора и ротора) ТАД, $[\frac{\text{Джл}}{^\circ\text{C}}]$, $[\text{^\circ C}]$; ΔP_H – номинальное значение потери активной мощности в ТАД, Вт.

Превышение тока статора выше его номинального значения приведет к расходу изоляции обмотки статора, характеризуемый скоростью изменения расхода изоляционного материала ε . Величина ε характеризует количество расхода базовых часов(бч) за один час работы ТАД и рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$\varepsilon = \varepsilon_H e^{q(\frac{1}{\theta_{1H}} - \frac{1}{\theta_{1Y}})}, \quad (30)$$

здесь ε_H – номинальное значение скорости теплового износа изоляции, бч/час; $\theta_{1H} = (\tau_{1T} + \vartheta_{\text{ср.}} + 273)$ – абсолютное значение номинальной температуры для данного класса изоляции, K ; $\vartheta_{\text{ср.}}$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; θ_{1Y} – фактическое значение абсолютной установившейся температуры, K ; q – показатель, характеризующий изоляцию данного класса, K .

Коэффициент потери электрической энергии ТАД определяется как:

$$a = \frac{\Delta P}{\Delta P_H} = \frac{\Delta P_{\text{пн}} + k^2 \Delta P_{\text{мн}}}{\Delta P_{\text{пн}} + \Delta P_{\text{мн}}} = \frac{a_{\text{к.з.}} + k^2}{a_{\text{к.з.}} + 1}, \quad (31)$$

здесь ΔP , ΔP_H – потери активной мощности ТАД соответственно в текущем и номинальном режимам его работы.

Ресурс изоляции оценивается с помощью коэффициента расхода ресурса изоляции, который рассчитывается по следующей формуле:

$$k_c = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H} = e^{q(\frac{1}{\theta_{1H}} - \frac{1}{\tau_1 + \vartheta_{\text{ср.}} + 273})}, \quad (32)$$

где τ_1 – текущее значение превышения температуры изоляции ТАД.

Условием нормального режима работы в ТАД является:

$$k_H \leq 1 \text{ и } k_c \leq 1. \quad (33)$$

Выражения (23), (27), (28) и (32) являются математическими моделями теплового процесса ТАД, с помощью которых можно произвести его функциональную диагностику и контроль технического состояния.

Заключение

Таким образом, в статье разработаны математические модели тепловых процессов ТАД, рассмотренного как тепловая система, состоящая из трех тел (обмотка статора, магнитопровод статора и ротора), в которых учтен теплообмен не только между соответствующими телами, но и теплообмен между каждым телом и окружающей средой. В результате этого повышается адекватность разработанных математических моделей тепловых процессов и, следовательно, достоверность результатов диагностики технического состояния эксплуатируемых ТАД. Установлено, что установившееся превышение температуры обмотки статора ТАД зависит от кратности тока обмотки статора k , коэффициента потерь a и температурного коэффициента сопротивления материала проводника обмотки α_θ . При этом диагностику и контроль технического состояния ТАД рекомендуется осуществить по коэффициентам потерь электрической энергии и расхода ресурса изоляции обмотки статора.

References:

1. U.T.Berdiev, A.V.Grisch'enko, E.V.Kozachenko, "Novy'e elektricheskie mashiny' lokomotivov: uchebnoe posobie dlya vuzov j.-d. transporta" [New electric locomotives: textbook for railway transport universities], Moskva: GOU «Uchebno-metodicheskiy sentr po obrazovaniyu na jelezno dorojnom transporte», 2008. - 271 s. (in Russian).
2. "Opisanie obispol'zovanii i soderjaniia elektrovoza s privodomperemennogo toka O'zbekiston" [Description of operation and maintenance of an AC electric locomotive in Uzbekistan], Izgotovlen CHEV3.2003. -714 s. (in Russian).

3. V.V.Ovcharov, "Ekspluatatsionny'e rejimy' raboty' i nepreryvnaya diagnostika elektricheskix mashin v sel'skoxozyaystvennom proizvodstve" [Operating modes and continuous diagnostics of electric machines in agricultural production], Kiev: USXA, 1990, 168 p. (in Russian).
4. V.G.SCH'erbakova, A.D.Petrushina, "Tyagovy'e elektricheskie mashiny'. Uchebnik" [Electric traction machines. Textbook], Moskva: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy s sentr po obrazovaniyu na jeleznodorojnom transporte», 2016, 641 p. (in Russian).
5. S. P.Harsha, "Nonlinear dynamics analysis of a high speed rotor supported by rolling element bearings", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 290, pp. 65-100, 2006.
6. V.V.Klyuevi dr., "Nerazrushayusch'iy kontrol' i diagnostika: Spravochnik" [Non-destructive testing and diagnostics: guide], - Moskva: Mashinostroenie, 2003, 656 p. (in Russian).
7. V.A.SHabarov, M.G.Bashirov, P.A.Xlyupini, "Diagnostika texnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya sistem elektrosnabjeniya: V 2 ch. - CH. I. Obsch'ie voprosy' i fizicheskie osnovy' metodov diagnostiki: ucheb. Posobie" [Diagnostics of the text state of electrical equipment of the power supply system: Vol. 2, -Part I. General questions and physical bases of diagnostic methods: tutorial], Moskva: Izdatel'stvo MEI, 2018, 288 p. (in Russian).
8. V.A.SHabarov, M.G.Bashirov, P.A.Xlyupini, "Diagnostika texnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya sistem elektrosnabjeniya: V 2 ch. - CH. II. Metody' diagnostiki texnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya: ucheb. Posobie" [Diagnostics of the technical condition of electrical equipment of the power supply system: Vol. 2, -Part I. Methods of diagnostics of the technical condition of electrical equipment: tutorial], - Moskva: Izdatel'stvo MEI, 2018, 316 p. (in Russian).
9. M.YU.Petushkov, "Teplovaya model' asinxronnogo dvigatelya" [Thermal model of an asynchronous motor], *Izvechiya VUZov. Severo-Kavkazskiy region. Texnicheskie nauki*, 2011, no. 4, pp. 48-50. (in Russian).
10. A.V.Makarov, M.V.Vecherkin, A.S.Zav'yalov, "Obzor teplovy'x modeley asinxronny'x dvigateley" [Overview of thermal models of asynchronous motors], *Elektrotexnicheskie sistemy' i komplekсы*, no. 21. pp. 75-84, 2013. (in Russian).
11. T.T.William, M.Fenger, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", *IEEE Industry Application Magazine*, no. 7, pp. 23-29, 2001.
12. M.S.Patil, J.Mathew, P.K.Rajendrakumar, D.Sadeep, "A theoretical model to predict the effect of localized defect on vibrations associated with ball bearing" *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 52, pp. 1193-1201, 2010.
13. S.F.Kurashkin, R.V.Telyuta, "Diagnostirovanie ekspluatatsionnogo rejima pogrujnogo elektrodvigatelya" [Diagnostics of the operating mode of a submersible electric motor], *NTP i effektivnost' proizvodstva*, no. 8(78), pp. 60-65, 2010. (in Russian).
14. S.V.Baburin, V.L.Jukovskiy, A.A.Korjev, A.V.Krivenko, "Sovremennyye metody' nerazrushayusch'ego kontrolya i diagnostiki texnicheskogo sostoyaniya elektroprivodov gornyx mashin" [Modern methods of non-destructive testing and diagnostics of the technical condition of electric drives of mining machines], Sankt-Peterburg: Peterburgskiy. gos. gorn. in-tim. G.V. Plexanova, 2009, 163 p. (in Russian).
15. M.F.Zaripov, N.R.Zaynullin, I.YU.Petrova, "Energo informatsionny'y metod na uchno-texnicheskogo tvorchestva" [Energy-informational method for scientific and technical creativity], Moskva: VNIPI GKNT, 1988, 124 p. (in Russian).
16. G.A.Sipaylov, D.I.Sannikov, V.A.Jadan, "Teplovy'e, gidravlicheskie aerodinamicheskie raschety' v elektricheskix mashinax" [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electrical machines]. Moskva, 1989. 239 p. (in Russian).
17. K.S.Demirchyan, L.R.Neyman, N.V.Korovkin, V.L.CHechurin, "Teoreticheskie osnovy' elektrotexniki" [Theoretical foundations of electrical engineering], Sankt-Peterburg: Piter, 2006, 445 p. (in Russian).
18. K.S.Demirchyan, L.R.Neyman, N.V.Korovkin, V.L.CHechurin "Teoreticheskie osnovy' elektrotexniki" [Theoretical Foundations of Electrical Engineering], Sankt-Peterburg: Piter, 2006, 572 p. (in Russian).
19. "Atatsiya i remont elektrovozov «O'ZBEKISTON» i «O'ZBEKISTON-YO'LOVCHI»: uchebnik dlya studentov jeleznodorojny'x vuzov" [Modernization and repair of electric locomotives "Uzbekistan" and "Uzbekistan-passenger": tutorial textbook for students of iron-water universities], Tashkent: izdatel'stvo «ADADPLYUS», 2016, 285 p. (in Russian).
20. L.G.Sidel'nikov, D.O.Afnas'ev, "Obzor metodov kontrolya texnicheskogo sostoyaniya asinxronny'x dvigateley v protsesse ekspluatatsii" [Overview of methods for monitoring the technical condition of asynchronous motors during operation], *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoedelo*, no. 7, pp. 127-137, 2013. (in Russian).