

М.М. Федоров, А.А. Ткаченко, А.Я. Грудачев, А.А. Резников

## ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ШАХТНЫХ ВАГОНООПРОКИДЫВАТЕЛЕЙ

*Анализ динамики тепловых процессов электродвигателей шахтных вагоноопрокидывателей. Выбор рабочего цикла горной машины для исключения перегрева обмотки статора.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: вагоноопрокидыватель, асинхронный двигатель, обмотка статора, тепловой процесс, рабочий цикл.*

*Аналіз динаміки теплових процесів електродвигунів шахтних вагоноперекидачів. Вибір робочого циклу гірничої машини для виключення перегрівання обмотки статора.*

*К л ю ч о в і с л о в а: вагоноперекидач, асинхронний двигун, обмотка статора, тепловий процес, робочий цикл.*

**Постановка проблемы.** Значительная часть угольного и породного грузопотока в шахтах осуществляется рельсовым транспортом, а наиболее распространенным средством разгрузки вагонеток является круговой опрокидыватель с электрическим приводом, который работает в повторно-кратковременном режиме с частотой включения от 30 до 80 в час и большим моментом инерции привода. Средний срок службы асинхронных двигателей (АД) привода опрокидывателя составляет 0,5...2 года. Основной причиной их отказов являются токовые перегрузки, приводящие к перегреву и выходу из строя изоляции обмоток статора.

Задачи снижения аварийности, продления срока службы АД и снижения эксплуатационных затрат могут быть решены путем анализа тепловых процессов, протекающих при эксплуатации электроприводов шахтных вагоноопрокидывателей. Результаты исследований позволят судить об особенностях теплового состояния АД и сформулировать практические рекомендации для повышения их надежности.

**Анализ публикаций.** Для привода вагоноопрокидывателей характерна работа с изменяющимся моментом инерции и моментом сил сопротивления, которые являются функциями угла поворота барабана опрокидывателя. При повороте барабана происходит постепенное высыпание груза, изменяется его масса, положение центра тяжести и момент инерции [1]. Переменные моменты инерции и сил сопротивления могут оказать существенное влияние на электромеханические процессы привода. В работе [2] предложен алгоритм расчета электромеханических характеристик привода

с переменными моментами инерции и сопротивления. Результаты расчетов позволяют судить об условиях эксплуатации подобных АД. Так, для электропривода вагоноопрокидывателя типа ОКЗ-360/90 получены зависимости активной мощности, потребляемой из сети, коэффициента мощности, действующих значений силы тока статора, электромагнитного момента двигателя  $M_D$  от угла поворота барабана. Значение и длительность токовых перегрузок, имеющих место в рабочем цикле вагоноопрокидывателя, исследованы в работе [3]. Полученные результаты позволяют провести оценку теплового состояния АД.

**Цель статьи.** Анализ динамики тепловых процессов и разработка рекомендаций по корректировке режима работы АД шахтных вагоноопрокидывателей с целью обеспечения их номинального срока службы и снижения аварийности.

**Результаты исследований.** В соответствии с методикой, изложенной в работах [1, 2], выполнено математическое моделирование электропривода шахтного вагоноопрокидывателя и получены графики переходных процессов силы тока статора и ротора, угловой частоты и электромагнитного момента. Так, на рисунке 1 приведены графики переходных процессов силы тока обмотки статора (действующее значение) и электромагнитного момента за один оборот опрокидывателя. Для удобства восприятия на графике значения силы тока  $\frac{I_\Phi(t)}{I_{\Phi H}}$  и момента  $\frac{M_{ЭЛ}(t)}{M_n}$  показаны в относительных единицах. В качестве базовых использованы номинальные значения силы тока фазы статора и момента соответственно.

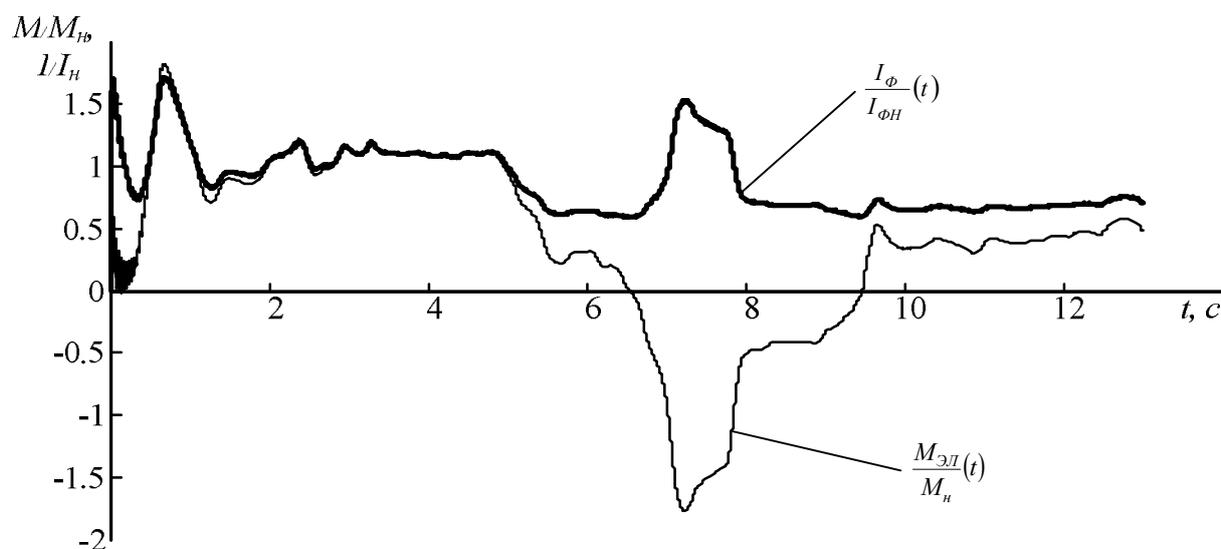


Рисунок 1 – Графики переходных процессов относительных электромагнитного момента и силы тока фазы статора асинхронного двигателя шахтного вагоноопрокидывателя за один оборот

Из рисунка 1 следует, что на отдельных рабочих участках электромагнитный момент и сила тока фазы статора существенно (в 1,8...2 раза) превышают номинальные значения. Следует отметить, что в момент включения сила тока превышает номинальную в 5,6 раза, что на графике не отмечено ввиду большого масштаба. На отрезке времени от 6,5 до 9,4 с электромагнитный момент принимает отрицательное значение, что соответствует режиму генераторного торможения АД. Таким образом, за время работы вагоноопрокидывателя сила тока и электромагнитный момент АД изменяются в широких пределах, а результаты моделирования, показанные на рисунке 1, позволяют более точно оценить мощность тепловых потерь в его элементах.

С целью анализа тепловых процессов в АД шахтного вагоноопрокидывателя составлена динамическая эквивалентная тепловая схема (ЭТС) замещения, приведенная на рисунке 2. При ее составлении выделены следующие узлы: пазовые части обмоток статора (1), лобовые части (2), сердечник статора (3), ротор (4), корпус (5), внутренний воздух (6).

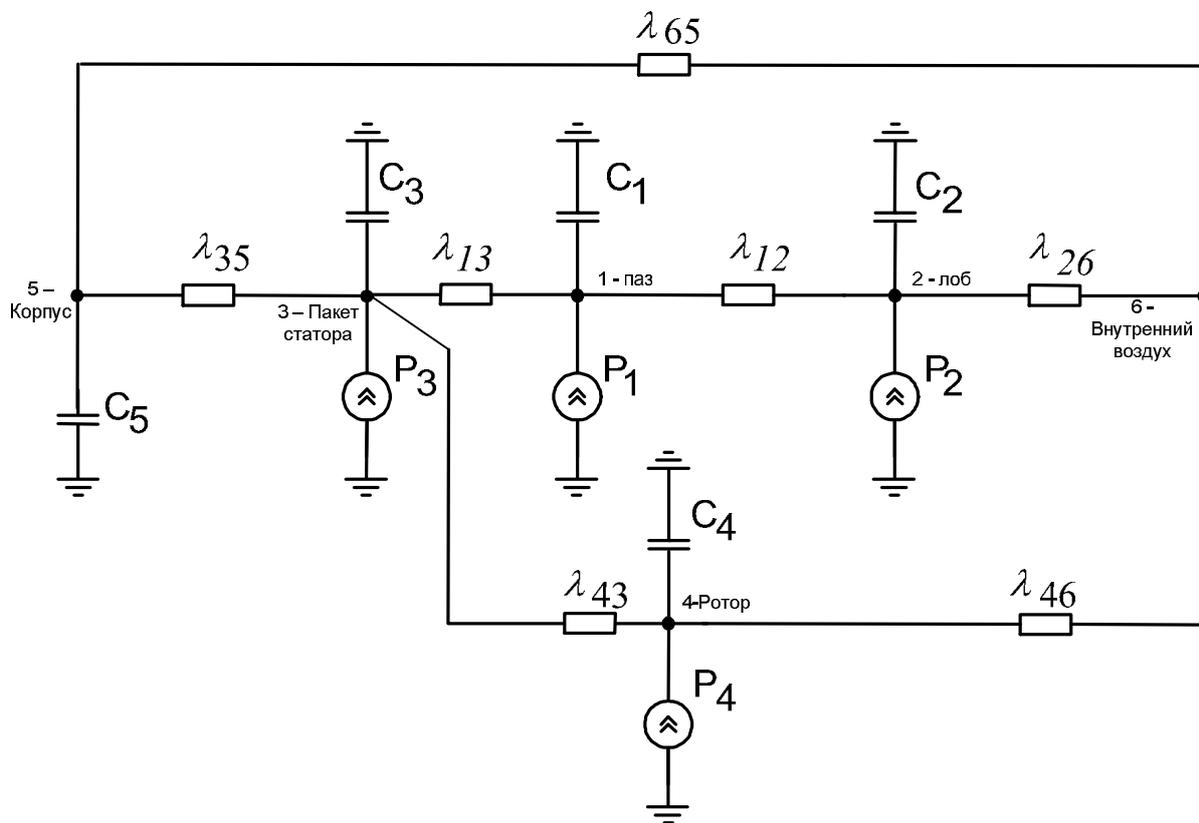


Рисунок 2 – Эквивалентная тепловая схема электродвигателя привода вагоноопрокидывателя

Система дифференциальных уравнений, описывающих тепловое состояние АД согласно ЭТС рисунка 1, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}
C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 \cdot (\lambda_{13} + \lambda_{12}) - \theta_3 \cdot \lambda_{13} - \theta_2 \cdot \lambda_{21} &= P_{01} \cdot (1 + \beta \cdot \theta_1) \cdot k_H^2; \\
C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} + \theta_2 \cdot (\lambda_{12} + \lambda_{62}) - \theta_1 \cdot \lambda_{12} - \theta_6 \cdot \lambda_{62} &= P_{02} \cdot (1 + \beta \cdot \theta_2) \cdot k_H^2; \\
C_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dt} + \theta_3 \cdot (\lambda_{13} + \lambda_{35} + \lambda_{43}) - \theta_1 \cdot \lambda_{13} - \theta_5 \cdot \lambda_{35} - \theta_4 \cdot \lambda_{43} &= P_{03} \cdot (1 + \beta \cdot \theta_3) \cdot k_H^2; \\
C_4 \cdot \frac{d\theta_4}{dt} + \theta_4 \cdot (\lambda_{43} + \lambda_{46}) - \theta_3 \cdot \lambda_{43} - \theta_6 \cdot \lambda_{46} &= P_{04} \cdot (1 + \beta \cdot \theta_4) \cdot k_H^2; \\
C_5 \cdot \frac{d\theta_5}{dt} + \theta_5 \cdot (\lambda_{65} + \lambda_{35} + \lambda_{50}) - \theta_6 \cdot \lambda_{56} - \theta_3 \cdot \lambda_{35} &= 0; \\
C_6 \cdot \frac{d\theta_6}{dt} + \theta_6 \cdot (\lambda_{46} + \lambda_{65} + \lambda_{62}) - \theta_4 \cdot \lambda_{46} - \theta_5 \cdot \lambda_{65} - \theta_2 \cdot \lambda_{62} &= 0,
\end{aligned} \right\} (1)$$

где взаимное тепловое влияние пазовых и лобовых частей обмотки статора описывается тепловыми проводимостями  $\lambda_{12}$ .

Тепло от пазовых частей обмоток статора через тепловые проводимости  $\lambda_{23}$  передается его сердечнику, от лобовых частей – через тепловые проводимости  $\lambda_{16}$  внутреннему воздуху. Ротор через воздушный зазор имеет тепловую связь с сердечником статора ( $\lambda_{43}$ ) и через его аксиальные каналы – с внутренним воздухом ( $\lambda_{46}$ ). Сердечник статора через «спинку» отдает тепло корпусу ( $\lambda_{35}$ ). Внутренний воздух омывает крайние части станины и подшипниковые щиты и передает тепло корпусу ( $\lambda_{65}$ ), а он через свою наружную ребренную поверхность – в окружающую среду ( $\lambda_{50}$ ). В системе уравнений (1) также обозначена теплоемкость:  $C_1$  –пазовых частей обмоток статора,  $C_2$  – лобовых частей обмоток статора,  $C_3$  – сердечника статора,  $C_4$  – ротора,  $C_5$  – корпуса,  $C_6$  – внутреннего воздуха.

Источниками тепловой энергии ЭТС являются: лобовые части обмоток статора ( $P_1$ ), их пазовые части ( $P_2$ ), сердечник статора ( $P_3$ ), ротор ( $P_4$ ). Тепловые потери в обмотках статора определяются аналогично рассмотренному ранее случаю по значениям силы тока и сопротивления с учетом температурного коэффициента сопротивления  $\beta$ .

В нормальном виде Коши система уравнений (1) приобретает вид:

$$\begin{aligned}
\frac{d\theta_1}{dt} &= \frac{P_{01} \cdot (1 + \beta\theta_1) \cdot k_H^2 - \theta_1 \cdot (\lambda_{13} + \lambda_{12}) + \theta_3 \cdot \lambda_{13} + \theta_2 \cdot \lambda_{21}}{C_1}; \\
\frac{d\theta_2}{dt} &= \frac{P_{02} \cdot (1 + \beta\theta_2) \cdot k_H^2 - \theta_2 \cdot (\lambda_{12} + \lambda_{62}) + \theta_1 \cdot \lambda_{12} + \theta_6 \cdot \lambda_{62}}{C_2}; \\
\frac{d\theta_3}{dt} &= \frac{P_{03} \cdot (1 + \beta\theta_3) \cdot k_H^2 - \theta_3 \cdot (\lambda_{13} + \lambda_{35} + \lambda_{43}) + \theta_1 \cdot \lambda_{13} + \theta_5 \cdot \lambda_{35} + \theta_4 \cdot \lambda_{43}}{C_3};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\theta_4}{dt} &= \frac{P_{04} \cdot (1 + \beta\theta_4) \cdot k_H^2 - \theta_4 \cdot (\lambda_{43} + \lambda_{46}) + \theta_3 \cdot \lambda_{43} + \theta_6 \cdot \lambda_{46}}{C_4}, \\
\frac{d\theta_5}{dt} &= \frac{-\theta_5 \cdot (\lambda_{65} + \lambda_{35} + \lambda_{50}) + \theta_6 \cdot \lambda_{56} + \theta_3 \cdot \lambda_{35}}{C_5}, \\
\frac{d\theta_6}{dt} &= \frac{-\theta_6 \cdot (\lambda_{46} + \lambda_{65} + \lambda_{62}) + \theta_4 \cdot \lambda_{46} + \theta_5 \cdot \lambda_{65} + \theta_2 \cdot \lambda_{62}}{C_6}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Она содержит шесть уравнений с шестью неизвестными значениями превышения температуры:  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – лобовых и пазовых частей обмотки статора;  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ ,  $\theta_5$ ,  $\theta_6$  – сердечника статора, ротора, корпуса и внутреннего воздуха соответственно. Входящие в системы уравнений (1) и (2) проводимости и теплоемкости рассчитаны по методикам [4]. В правых частях уравнений представлена мощность источников тепла (тепловые потери в элементах конструкции). Они подразделяются на постоянные, не зависящие от нагрузки (потери в стали), переменные, зависимость которых от нагрузки учитывается коэффициентами нагрузки  $k_{li}$ , и добавочные.

Источниками переменных потерь являются:  $P_1$ ,  $P_2$  – потери в пазовых и лобовых частях обмотки статора,  $P_4$  – потери в роторе. Мощность источников тепловыделения в обмотке статора рассчитывают в соответствии с зависимостью  $P = k_I^2 \cdot P_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$ ,

где  $P_0 = I_n^2 \cdot r_0$  – мощность электрических потерь обмотки при номинальной силе тока  $I_n$ , и сопротивлении  $r_0$ , приведенном к температуре окружающей среды;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Распределение потерь в лобовой и пазовой частях обмотки статора пропорционально соотношению их длины:  $P_1 = P \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2}$ ,  $P_2 = P \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2}$ ,

где  $l_1$ ,  $l_2$  – длина лобовой и пазовой частей обмотки.

Потери в обмотке ротора определяются как  $P_4 = P_1 - P_2 - \Sigma P_c$ ,

где  $P_1$  – суммарная мощность, потребляемая из сети;

$P_{c2}$  – механическая мощность на валу;

$\Sigma P_i$  – суммарные потери статора.

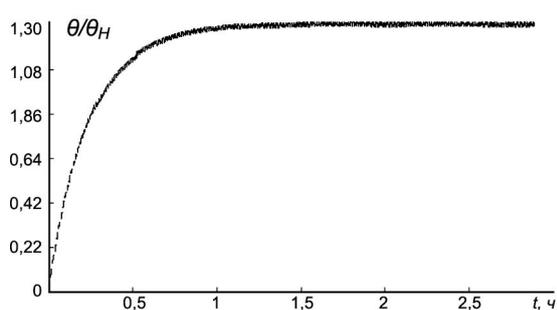
Добавочные потери могут быть постоянными и находиться в функциональной зависимости от силы тока. Потери, обусловленные зубцовыми гармониками, считают пропорциональными квадрату силы тока:

$$P_{\text{доб}} = \beta^2 \cdot p_{\text{добн}},$$

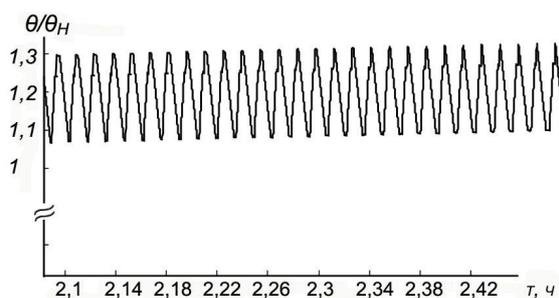
где  $p_{\text{добн}}$  – добавочные потери в узле  $i$  при номинальной нагрузке.

Полученное математическое описание позволяет проводить расчет динамики тепловых процессов. Известно, что наиболее нагретыми и уязвимыми от тепловых перегрузок частями АД являются лобовые части обмоток статора, расположенные с противоположной от вентилятора стороны. Поэтому далее рассматриваются тепловое состояние именно этих элементов.

В качестве примера на рисунке 3 показан график переходного процесса нагревания лобовых частей обмотки статора АД типа КО-11-6 (380 В, 6 кВт, 14,5 А) вагоноопрокидывателя при частоте включений 80 1/ч ( $\theta$  – температура обмотки, °С;  $\theta_n=130$  °С – максимально допустимая температура для класса нагревостойкости изоляции класса В согласно ГОСТ 8865-93). На рисунке 4 укрупненно показан участок с квазиустановившейся температурой (при  $t > 2,1$  ч).



*Рисунок 3 – График переходного процесса нагрева лобовой части обмотки статора электродвигателя вагоноопрокидывателя*



*Рисунок 4 – График переходного процесса нагрева лобовой части обмотки статора на участке с квазиустановившейся температурой*

Из рисунков 3, 4 следует, что в данном режиме работы температура лобовых частей обмоток статора существенно превышает максимально допустимую для данного класса нагревостойкости изоляции В. Так, среднее значение квазиустановившейся температуры превышает максимально допустимое на 24,7 °С, достигая  $130 + 24,7 = 154,7$  °С.

Увеличение среднего значения температуры приводит к сокращению срока службы изоляционных материалов обмоток. Так, для данного случая, используя известное «10-градусное правило» Вант-Гоффа – Аррениуса, следует ожидать сокращения срока службы изоляции примерно в 6 раз или до 3300 ч вместо 20 000 ч, нормированных ГОСТ 8865-93 для предельной температуры каждого класса нагревостойкости. Выход из этой ситуации возможен только при переходе к классу нагревостойкости изоляции F (для него  $\theta_n=155$  °С) и тем более – классу H (180 °С). Учитывая, что на уменьшение срока службы изоляционных материалов в повторно-кратковременном режиме работы, кроме среднего значения температуры в цикле, оказывает влияние и размах ее колебаний, следует ожидать еще

большей интенсивности расхода ресурса.

Аналогично рассмотренному случаю выполнено математическое моделирование динамики тепловых процессов для различного количества включений. При этом приняты допущения о постоянной длительности периода работы, одинаковой силе тока и одинаковой длительности пауз. Относительные значения средней за цикл в квазиустановившемся режиме температуры  $\theta/\theta_n$  при количестве включений в час N и соответствующей продолжительности включения ПВ приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	N	ПВ, %	$\theta/\theta_n$
1	80	33,3	1,19
2	70	29,2	1,15
3	60	25,0	1,07
4	49	20,8	1,0
5	40	16,7	0,91
6	30	12,5	0,81

Из таблицы 1 следует, что для исключения перегрева обмоток статора АД привода вагоноопрокидывателя необходимо, чтобы число включений не превышало 49 в час.

**Вывод.** Выполнен анализ динамики тепловых процессов АД шахтного вагоноопрокидывателя. Предложено скорректировать рабочий цикл этой горной машины для исключения перегрева обмоток свыше максимально допустимой температуры, что позволит добиться повышения срока службы АД.

#### Список литературы

1. Будишевский В.А. Характеристики моментов инерции и сопротивления электроприводов шахтных вагонеток / В.А. Будишевский, А.И. Резников // Материалы VIII международной научно-технической конференции «Механика жидкости и газа». – Донецк: ДонНТУ, 2009. – С. 192-198.
2. Федоров М.М. Электромеханические характеристики электропривода с переменными моментами инерциями и сопротивления / Федоров М.М, Будишевский В.А., Резников А.А., Ткаченко А.А. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2010. – С. 223 – 230.
3. Федоров М.М. Динамика электромеханических процессов электроприводов шахтных вагоноопрокидывателей / М.М.Федоров, А.Я. Грудачев, А.А. Ткаченко // Научный вестник ДГМА. – 2011. – № 2 (8Е). – С. 154-160.
4. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах /А.И.Борисенко, В.Г.Данько, А.И.Яковлев.– М.:Энергия, 1974. – 560 с.