

УДК 629.423.31

*К.К. Жураева, Е.В. Иксар, И.Ф. Халилова*

*Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Аннотация.** В статье рассмотрено тепловое состояние частотно-управляемого асинхронного двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме. Приведены расчеты теплового состояния асинхронного двигателя, работающего от полупроводникового преобразователя частоты с автономным инвертором.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, ротор, режим работы, потери, тепловой процесс, температура.

*К.К. Jurayeva, E.V. Iksar, I.F. Khalilova*

*Tashkent state of transport university, Tashkent, Republic of Uzbekistan*

## **OPTIMIZATION OF THE THERMAL STATE OF A TRAKING ASYNCHRONOUS FREQUENCY CONTROL MOTOR TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY**

**Abstract.** In the article considers the thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor operating in a repeated-short-term mode. Calculations of the thermal state of an asynchronous motor operating from a semiconductor frequency converter with an autonomous inverter are presented.

**Keywords:** asynchronous motor, rotor, operating mode, losses, thermal process, temperature.

### **Введение**

Асинхронный электропривод на сегодняшний день самый востребованным среди приводов железнодорожного транспорта. Основными тягово - энергетическими показателями электроприводов с асинхронным двигателем является достижение наибольшего коэффициента полезного действия, снижение электрических потерь в системе автономный инвертор напряжения (АИН) – асинхронный двигатель. Асинхронный двигатель имеет высокие эксплуатационные и энергетические показатели. Позволяет наиболее полно использовать сцепную массу локомотива по сравнению с коллекторными тяговыми двигателями и реализовать повышенную осевую мощность.

В тяговом режиме у локомотивов с асинхронным приводом повышается вероятность перегрева элементов конструкции тягового двигателя. Последствием перегрева являются: пробой изоляции обмоток, межвитковые замыкания в обмотках статора, ускоренное старение изоляции, что приводит к сокращению срока службы [1-4]. Перегрев АД происходит также при работе двигателя в режимах холостого хода, тяги и тормозных режимах, поэтому актуальным является мониторинг перегрева и изменения теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей (АТД).

### **Методы оценки перегрева элементов и узлов АТД**

Современные методы оценки перегрева элементов конструкции и узлов АТД основаны на применении термодатчиков, которые встраиваются в отдельные узлы АТД это не позволяет точно оценить температурную нагрузку на все узлы электродвигателя, поскольку узел, в который устанавливается термодатчик не всегда оценивается как наиболее нагретый. Наиболее точным является расчетный анализ взаимосвязанных узлов АТД. Асинхронный двигатель можно представить как комплекс взаимосвязанных узлов, изменение температуры которых описывается системой уравнений теплового баланса. При расчете теплового состояния асинхронного двигателя в тяговом режиме учитывается, что АТД питается от

полупроводникового преобразователя частоты с автономным инвертором, поэтому на выходе преобразователя получается напряжение несинусоидальной, а ступенчатой формы, что обусловлено наличием высших гармоник напряжения и тока вследствие чего увеличиваются основные и добавочные потери мощности. Эти потери являются основными источником тепла в активных узлах асинхронного двигателя электродвигателя [5-8]. Поэтому при расчёте тепловых режимов асинхронного двигателя необходимо учитывать искажение формы сигналов при изменении частоты в сложных переходных режимах, например, во время выбега двигателя, торможения с рекуперацией энергии в сеть. При оценке температурных режимов работы учитывается составляющая суммарных потерь мощности, не зависящих от нагрузки при регулировании частоты вращения [5, 9, 10]. Основными параметрами оценки тепловых режимов АТЭД, являются: напряжение сети, фазный ток статора, скорость движения локомотива, режим работы, расход охлаждающего воздуха, температура входного воздуха и температура выбранного опорного узла. При расчете нагрева, используется значения потерь, полученных для номинального режима. Потери в изолированных обмотках статора отличаются от расчетных. Поэтому учитывается, что обмотки могут быть нагреты до предельно допустимой температуры принятого класса нагревостойкости изоляции. Для класса F - до 140°C и при классе H - до 165°C. Коэффициент увеличения потерь нагрева изоляции  $k_p$  учитывает отклонение от расчетной температуры и составит для обмоток с изоляцией класса F  $k_p = \rho_{140} / \rho_{115} = 1,07$ , для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости H  $k_p = \rho_{165} / \rho_{115} = 1,45$

Повышение температуры в обмотке статора происходит за счет электрических потерь в пазовой части  $P'_{\Sigma, \text{пл}}$  и потерь в лобовых частях катушек  $P'_{\Sigma, \text{лп}}$  и определяются по формуле:

$$P'_{\Sigma, \text{лп}} = k_p P_{\Sigma, \text{лп}} \frac{2l_1}{l_{\text{срл}}}$$

Превышение температуры сердечника статора над температурой воздуха внутри машины, °C,

$$\Delta \vartheta_{\text{пов1}} = K \frac{P'_{\Sigma, \text{лп}} + P_{\text{ст.оон}}}{\pi D l_1 \alpha_1},$$

где  $\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи с поверхности двигателя.

$K$  - коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки,

Нестационарный тепловой процесс в асинхронном тяговом двигателе с частотным управлением можно описать системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка [9, 11-13]. Число уравнений зависит от количества выбранных узлов и мощности тепловыделения. Для каждого узла составляется уравнение теплового баланса, которые образуют систему дифференциальных уравнений.

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} &= \left( - \sum_{i=2}^m \lambda_{i1} \right) \cdot \Theta_1 + \sum_{i=2}^m (\lambda_{i1} \cdot \Theta_i) + P_1 \\ C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} &= \left( - \sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \lambda_{i2} \right) \cdot \Theta_2 + \sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} (\lambda_{i2} \cdot \Theta_i) + P_2 \end{aligned} \right\}$$

где  $C_1 - C_n$  - теплоемкости отдельных узлов,  $\Theta_1 - \Theta_n$  - температуры узлов,  $\lambda_{i1} - \lambda_{in}$  - тепловые проводимости соответствующего узла,  $P_1 - P_n$  - соответствующие мощности

тепловыделения в данном узле,  $t$  - текущее время;  $m$  - количество нагретых узлов,  $\sum_{i=2}^m \lambda_{i1}$  - собственная тепловая проводимость первого узла.

Принимается что начальные температуры  $\Theta_{\text{нач}}$  всех узлов одинаковы, время расчета в определяется интервалам режима нагрузки  $T_{\text{н}}$  – минут, и интервалом холостого хода  $T_{\text{х}}$  – Каждый из интервалов характеризуется своим уровнем основных и добавочных потерь как в режиме тяги так и в режиме холостого хода  $\sum P_{\text{доб}}$ , от основной гармоники и от высших гармоник напряжения на интервалах  $T_{\text{н}}$  и  $T_{\text{х}}$  принимаются одинаковыми. При расчете теплового состояния асинхронного двигателя, работающего от полупроводникового преобразователя частоты с автономным инвертором регулирования при номинальной нагрузке учитывается диапазон изменения напряжения и частоты [2, 5, 14]

$$v = \alpha = 1,0 \left( v = \frac{U_1}{U_{1N}}, \alpha = \frac{f_1}{f_{1N}} \right)$$

Переход от тягового режима к режиму холостого хода характеризуется дополнительными электрическими и магнитными потерями, которые несколько уменьшаются. За счет этого уменьшается температура окружающего воздуха в контуре охлаждения. Это приводит к изменению мощности тепловыделения. В основных узлах двигателя мощности тепловыделения остаются без изменения. При переходе в пределах от интервала нагрузки  $T_{\text{н}}$  к интервалу холостого хода  $T_{\text{х}}$  и от интервала холостого хода к интервалу нагрузок, начальные значения температур на интервалах  $T_{\text{н}}$  и  $T_{\text{х}}$  для всех узлов определяются по формуле:

$$\Theta_{k \text{ нач}}^{\text{х.х.}} \Big|_{t=0} = \Theta_{k \text{ кон}}^{\text{нагр.}} \Big|_{t=T_{\text{н}}},$$

$$\Theta_{k+1 \text{ нач}}^{\text{нагр.}} \Big|_{t=0} = \Theta_{k \text{ кон}}^{\text{х.х.}} \Big|_{t=T_{\text{х}}}.$$

Текущее время  $t$  на каждом интервале каждого цикла начинается с нуля. Определение фактического времени нагрева отсчитывается от времени нагрева опорного узла, которым выбран сердечник статора электродвигателя. В расчетах принято допущение: теплопроводность материала тела достаточно большая, внутренние перепады температуры нагрева на поверхности и определяются временем фактического нагрева опорного узла:

$$t_{\phi} = -T \cdot \ln \left( \frac{\nu_0 - \nu_{\text{усто}}}{\nu_{\text{о.с.}} - \nu_{\text{усто}}} \right),$$

где  $T$  – постоянная нагрева стали сердечника статора ;

$\nu_0$  - температура сердечника статора;

$\nu_{\text{усто}}$  - установившаяся температура сердечника статора;

$\nu_{\text{о.с.}}$  - температура окружающей среды.

Фактическая температура узлов тягового двигателя:

$$\nu_i = \nu_{\text{уст}i} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{\phi}}{T_i}} \right) + \nu_{\text{о.с.}} \cdot e^{-\frac{t_{\phi}}{T_i}}$$

где  $\nu_i$  – фактическая температура узла;

$\nu_{\text{уст}i}$  - установившаяся температура узла;

$T_i$  - постоянная нагрева узла.

Превышения температур воздуха при продуве его через тяговый двигатель определяем с учетом полученных значений фактических температур нагрева узлов двигателя из системы уравнений теплового баланса

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n v_j \cdot \lambda_j + v_{i-1} \cdot X}{\sum_{j=1}^n \lambda_j}$$

где  $v_i$  – фактическая температура подогрева воздуха;

$\sum_{j=1}^n v_j \cdot \lambda_j$  - сумма тепловыделений в нагретой области;

$v_{i-1} \cdot X$  - подогрев воздуха в текущей области;

$\sum_{j=1}^n \lambda_j$  - сумма проводимостей данной области воздуха.

### Заключение

Из результатов расчета следует, что теплообмен в узлах двигателя на начальном участке отличается от теплообмена в установившемся режиме для двигателя, работающего от полупроводникового преобразователя частоты с автономным инвертором. Для обмотки ротора в этом режиме имеет место реверс теплового потока через воздушный зазор в сравнении с его направлением в установившемся режиме. Это обусловлено текущими значениями температур зубцов статора и обмотки ротора. Температура в режиме холостого хода, уменьшается за счет мощности тепловыделения. Колебания температуры ограничиваются дополнительными электрическими и магнитными потерями от высших гармоник тока. Тепловой расчет тяговых асинхронных двигателей позволяет анализировать тепловое состояние всех элементов конструкции АД во время его эксплуатации на электровозе в тяговом режиме.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радин В.И. Электрические машины. Асинхронные машины/ В.И. Радин, А.Э. Брускин, А.Е. Зорохович. – М.: Высшая школа, 1988. – 324 с.
2. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах/ А.В.Иванов-Смоленский, Ю.В.Абрамкин, А.И.Власов, В.А.Кузнецов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216с.
3. Брынский Е.А. Определение частотных характеристик гидрогенератора СВ-1500/200-88. – В кн. Теория, расчет и исследование высокоиспользованных электрических машин. – М.-Л.: Наука, 1965. – С. 85 – 94.
4. Дорохина Е.С. Косвенная оценка теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей / Е.С. Дорохина // IV Международная научно-техническая конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии управляемые электромеханические системы» ЕЕССЕС-2011, УрФУ, Екатеринбург, 2011 г., с. 52-55.
5. Бурханходжаев А.М., Бердиев У.Т., Каримов Р.Ч., Иксар Е.В. Программа минимума электрических потерь мощности в асинхронном тяговом двигателе магистральных локомотивов. Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий. Сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции, 2020 с 45 - 48.
6. Бурханходжаев А.М., Иксар Е.В., Жураева К.К. Алгоритм снижения электрических потерь в тяговом асинхронном приводе. Международный научно и научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы инновационной техники и технологий в аграрном-пищевом секторе» Ташкент 2020 г.
7. Казовский Е.Я.Переходные процессы в электрических машинах переменного тока.- Л.:Энергия, 1962.-624с.

8. Кононенко Е.В., Кононенко К.Е., Кружков В.Г. Анализ работы асинхронных двигателей при несимметрии первичного напряжения // Изв. вузов.- Электромеханика. - 2000. - №1. - с.30-36.
9. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. -Л.:Энергия, 1980. -256с.
10. Казовский Е.Я., Рубисов Г.В. Внезапные несимметричные КЗ синхронной машины, включенной в мощную сеть // Исследование турбо- и гидрогенераторов большой мощности. - Л.: Наука, 1977.- с. 67-84.
11. Осташевский Н.А. Математическая модель теплового состояния частотноуправляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах.
12. Elena Iksar, Mokhira Idriskhodjaeva An algoritm for controlling a tracsion asynchronous drive that minimizes electrical power losses E3S Web Conferences 216. 01107 (2020) RSES 2020
13. Karimov R.Ch. Usmonov K.K. Iksar E. Program for calculating the minimum electrical power loss in an asynchronous traction engine of mainline lokomotives International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29. No. 11s. (2020). pp.1416-1422
14. Ларин А.М., Ларина И.И., Гуедили Фаузи. Упрощенная модель синхронной машины для расчета трехфазных коротких замыканий с учетом многоконтурности и несимметрии ротора. Научные труды ДонГТУ, серия Электротехника и энергетика, вып. Донецк. - 1999. - С. 60-64.

#### REFERENCES

1. Radin V. I. Electric machines. Asynchronous machines/ V. I. Radin, A. E. Bruskin, A. E. Zorokhovich. - M.: Higher School, 1988 -- 324 p.
2. An universal method for calculating electromagnetic processes in electric machines/ A.V. Ivanov-Smolensky, Yu. V. Abramkin, A. I. Vlasov, V. A. Kuznetsov. - Moscow: Energoatomizdat, 1986 – 216 p.
3. Brynsky E. A. Determination of the frequency characteristics of the SV-1500/200-88 hydrogenerator. - In kn. Theory, calculation and research of highly used electric machines. - M.-L.: Nauka, 1965. - pp. 85-94.
4. Dorokhina E. S. Indirect assessment of the thermal state of asynchronous traction electric motors/ E. S. Dorokhina // IV International Scientific and Technical Conference "Electromechanical and electromagnetic energy converters controlled electromechanical systems" EECCES-2011, UrFU, Yekaterinburg, 2011, pp. 52-55.
5. Burkhanhodzhaev A.M., Berdiev U. T., Karimov R. Ch., Iksar E. V. The program of minimization of electrical power losses in the asynchronous traction engine of mainline locomotives. Electrical equipment, electrical technologies and electrical equipment of enterprises. Collection of scientific papers of the V International Scientific and Technical Conference, 2020 pp. 45-48.
6. Burkhanhodzhaev A.M., Iksar E. V., Jurayeva K. K. Algorithm for reducing electrical losses in a traction asynchronous drive. International scientific and technical Conference "Problems and prospects of innovative equipment and technologies in the agricultural and food sector" Tashkent 2020.
7. Kazovsky E. Ya. Transients in alternating current electric machines. - L.: Energiya, 1962.-p. 624
8. Kononenko E. V., Kononenko K. E., Kruzchkov V. G. Analysis of the operation of asynchronous motors with primary voltage asymmetry // Izv. vuzov.- Electrical engineering. - 2000. - No. 1. - p. 30-36.
9. Vazhnov A. I. Transients in alternating current machines. - L.: Energiya, 1980. – p. 256
10. Kazovsky E. Ya., Rubisov G. V. Sudden asymmetric short circuits of a synchronous machine included in a powerful network // Research of turbo and hydro generators of high power. - L.: Nauka, 1977.- pp. 67-84.

11. Ostashevsky N. A. Mathematical model of the thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor in non-stationary modes.
12. Elena Iksar, Mokhira Idriskhodjaeva An algorithm for controlling a traction asynchronous drive that minimizes electrical power losses E3S Web Conferences 216. 01107 (2020) RSES 2020
13. Karimov R.Ch. Usmonov K.K. Iksar E. Program for calculating the minimum electrical power loss in an asynchronous traction engine of mainline lokomotives International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29. No. 11s. (2020). pp.1416-1422
14. Larin A.M., Larina I. I., Guedidi Fauzi. A simplified model of a synchronous machine for calculating three-phase short circuits, taking into account multi-circuit and rotor asymmetry. Scientific works of DonGTU, series of Electrical Engineering and Power Engineering, vol. Donetsk. - 1999. - p. 60-64.

#### **Информация об авторах**

*Жураева Камила Комиловна* – PhD доктор философии по техническим наукам, доцент, доцент кафедры «Электроснабжения», Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: lade00@bk.ru

*Иксар Елена Владимировна* – старший преподаватель кафедры «Электротехника», Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: lade00@bk.ru

*Халилова Ирода Фахриддин кизи* – студентка 3-го курса Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: irodaxalilova1605@mail.ru

#### **Information about the author**

*Kamila Komilovna Jurayeva* – PhD Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of "Power Supply", Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: lade00@bk.ru

*Elena Vladimirovna Iksar* – Senior Lecturer of the Department of "Electrical Engineering", Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: lade00@bk.ru

*Iroda Fakhriddin kizi Khalilova* - 3rd year student of the Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: irodaxalilova1605@mail.ru