

**МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ПО ДОПУСТИМОМУ НАГРЕВУ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ,
РАБОТАЮЩИХ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ
В СОСТАВЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ШИМ**

**TEST METHOD FOR PERMISSIBLE HEATING OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS
OPERATING IN INTERMITTENT MODES AS PART
OF VARIABLE FREQUENCY DRIVES WITH PULSE-WIDTH MODULATION**

Ключевые слова: энергосбережение в сельском хозяйстве, асинхронный частотно-регулируемый электропривод переменного тока.

В настоящее время проблемы энергосбережения, особенно в агропромышленном секторе, приобретают значительную важность и актуальность. В этой связи особое практическое значение представляют исследования энергетических режимов частотно-регулируемых асинхронных электроприводов переменного тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В значительной мере это касается наиболее важных для режимов энергосбережения показателей потерь мощности в частотно-регулируемой асинхронной машине и её перегрева при работе в стационарных и циклических режимах широко используемых в водоснабжающих установках в сельской местности, транспортёрах на зернохранилищах, агропромышленных комплексах по выращиванию скота и птицы. Целью работы является исключение возможности перегрева асинхронных электродвигателей, работающих в повторно-кратковременных режимах в составе частотно-регулируемых электроприводов с ШИМ. Сущность проверки асинхронного электродвигателя на нагрев заключается в сравнении допустимой для класса изоляции его обмоток температуры с той, которую он имеет при выполнении технологических процессов. Эта проверка выполняется прямыми или косвенными методами исследований и расчетов. Исследования, приведенные в работе, получены с применением математических расчетов и использования моделирования электромеханических процессов. Необходимым условием нормального функционирования частотно-регулируемой асинхронной машины без теплового перегрева в продолжительных режимах является не превышение фактически создаваемой общей электромагнитной мощностью потерь $\Delta P_{\text{э.м.м.}}$ и тем самым по потерям мощности, эквивалентному току, моменту можно косвенно судить о перегреве двигателя. Разработанные в исследовании формулы зависимостей можно использовать для инженерных расчетов по проверке допустимого теплового нагрева и контроля энергопотребления самовентилируемых асинхронных электродвигателей, питаемых от

статических преобразователей с ШИМ и работающих в переменных повторяющихся режимах, в том числе на животноводческих и птицеводческих предприятиях.

Keywords: energy saving in agriculture, asynchronous variable frequency drive of alternating current.

Currently, energy saving problems, especially in the agro-industrial sector, is of significant importance and relevance, in this regard, studies of energy modes of frequency-controlled asynchronous AC electric drives with pulse-width modulation (PWM) are of particular practical importance. To a large extent, this concerns the most important for energy saving modes indices of power losses in a frequency-controlled asynchronous machine and its overheating during operation in stationary and cyclic modes widely used in water supply installations in rural areas, conveyors in grain storage facilities, agro-industrial complexes for raising livestock and poultry. The research goal is to eliminate the possibility of overheating of asynchronous electric motors operating in intermittent modes as part of frequency-controlled electric drives with PWM. The essence of checking an asynchronous electric motor for heating is to compare the permissible temperature for the insulation class of its windings with the one it has when performing technological processes. This check is performed by direct or indirect methods of research and calculations. The studies discussed were conducted using mathematical calculations and modeling of electromechanical processes. A necessary condition for the normal operation of a frequency-controlled asynchronous machine without thermal overheating in continuous modes is not exceeding the actually created total electromagnetic power of losses and thus, by the power losses, equivalent current, torque, one can indirectly judge the overheating of the motor. The formulas of dependencies derived in the study may be used for engineering calculations to check the permissible thermal heating and control the energy consumption of self-ventilated asynchronous electric motors fed from static converters with PWM and operating in variable repetitive modes including at livestock and poultry enterprises.

Кузнецов Андрей Юрьевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, г. Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: gvalahara2020@yandex.ru.

Понуровский Виктор Андреевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, г. Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: v-a-pon@mail.ru.

Александров Игорь Юрьевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ig.aleksandrov@mail.ru.

Кокшарова Марина Васильевна, к.п.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: koksharova70@mail.ru.

Kuznetsov Andrey Yurevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Novosibirsk State Agricultural University, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: gvalahara2020@yandex.ru.

Ponurovskiy Viktor Andreevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Novosibirsk State Agricultural University, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: v-a-pon@mail.ru.

Aleksandrov Igor Yurevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ig.aleksandrov@mail.ru.

Koksharova Marina Vasilevna, Cand. Pedagogic Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: koksharova70@mail.ru.

Введение

Обоснованный выбор требуемой мощности электродвигателя и совершенствование методики расчета проверки по нагреву используемого электропривода один из эффективных путей повышения экономии электроэнергии в агропромышленных комплексах по выращиванию скота и птицы, насосов водоснабжающих установок в сельской местности, в транспортёрах на зернохранилищах и элеваторах.

При выборе асинхронного электродвигателя для электропривода производится проверка по нагреву. При работе электродвигатель нагревается, и допустимая температура его нагрева определяется нагревостойкостью изоляции, установленной изготовителем, превышение этих заданных показателей температуры ведет к потерям энергии [1], ускоренному старению изоляции обмоток и тем самым к снижению времени эксплуатации электродвигателя.

Применяемые прямые и косвенные методы проверки на нагрев частотно-регулируемого асинхронного двигателя на практике рассчитываются без учета несинусоидальности статорных напряжений, и тем самым создается неточность в расчетах как общих потерь мощности, так и модуляционных составляющих главного магнитного потокосцепления электродвигателя.

Особенно это относится к электроприводам с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), реализующим релейные режимы регулирования статорного тока, в частотности режима релейного регулирования модуля обобщенного вектора статорного тока или намагничивающей и активной ортогональных проекций указанного вектора в токовом коридоре [2].

Цель исследований – исключение возможности перегрева асинхронных электродвигателей, работающих в повторно-кратковременных ре-

жимах в составе частотно-регулируемых электроприводов с ШИМ.

Материалы и методы

Необходимым условием функционирования частотно-регулируемой асинхронной машины без теплового перегрева в продолжительном режиме является не превышение фактически создаваемой общей электромагнитной мощностью потерь $\Delta P_{эм}$ допустимого максимального значения отводимой из машины мощности электромагнитных потерь $\Delta P_{эм.м}$:

$$\Delta P_{эм} \leq \Delta P_{эм.м}. \quad (1)$$

С учетом выражения для расчета общей электромагнитной мощности потерь $\Delta P_{эм}$, реально учитывающей собой потери в стали и добавочные потери [3] асинхронной машины в электроприводах с ШИМ:

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_{эм.1} + \Delta P_{эм.п}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{эм.1}$ и $\Delta P_{эм.п}$ – соответственно, основная и модуляционная составляющие общих электромагнитных потерь мощности $\Delta P_{эм}$ машины, запишем условие (1) в виде:

$$\Delta P_{эм.1} \leq \Delta P_{эм.м} - \Delta P_{эм.п}. \quad (3)$$

Подавляющее большинство частотно-регулируемых электроприводов эксплуатируются с магнитно-ненасыщенным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором [4] в диапазоне скоростей не выше номинальной ($\omega_1 \leq 1$ о. е.) [5], для которого известны следующие соотношения мощностей потерь: $\Delta P_{см.1} \leq \Delta P_{см.н}$ и $\Delta P_{см.п} \approx 0$ (где $\Delta P_{см}$ – общие магнитные потери мощности в стали аналогично электромагнитной мощности потерь учитываем как сумму двух составляющих магнитных потерь от действия основной $\Delta P_{см.1}$ и $\Delta P_{см.п}$ модуляционной составляющих в воздушном зазоре главного магнитного пото-

косоцепления; $\Delta P_{\text{см.н}}$ – значение магнитных потерь мощности машины при номинальном режиме работы). Ограничиваясь оценкой, зависящей от амплитуды I_1 главной гармоники статорного тока основной составляющей $\Delta P_{\text{э.1}}$ в создаваемых суммарных электрических потерях, и сравнивая ее с максимально допустимой величиной мощности отводимых из машины электрических потерь $\Delta P_{\text{эм}}$, можно выражение (3), проверки машины на нагрев в частотно-регулируемых электроприводах, привести к удобной формуле для инженерных расчетов:

$$\Delta P_{\text{э.1}} \leq \Delta P_{\text{эм}} - \Delta P_{\text{э.п}}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{э.п}}$ – модуляционная составляющая электрических потерь мощности, зависящая от модуляционных пульсаций тока в обмотке статора $\Delta I_{\text{п}}$.

Для асинхронных машин с независимой вентиляцией допустимые максимальные значения отводимой из машины мощности электрических и электромагнитных потерь находим из следующих формул:

$$\Delta P_{\text{э.м}} = \Delta P_{\text{э.н}} \text{ или } \Delta P_{\text{эм.м}} = \Delta P_{\text{эм.н}}; \quad (5)$$

для самовентилируемых двигателей:

$$\Delta P_{\text{э.м}} = \lambda \Delta P_{\text{э.н}} \text{ или } \Delta P_{\text{эм.м}} = \lambda \Delta P_{\text{эм.н}}. \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) $\Delta P_{\text{э.н}}$ и $\Delta P_{\text{эм.н}}$ номинальные значения электрических и электромагнитных потерь мощности двигателя рассчитываются из известных выражений для $\Delta P_{\text{э.1}}$ и $\Delta P_{\text{эм.1}}$ (при номинальных условиях: $I_1, \omega=1$ о.е.):

$$\Delta P_{\text{э.1}} = (R_s + \kappa^2 R_r \sin^2 \varphi) I_1^2, \quad (7)$$

$$\Delta P_{\text{эм.1}} = \left[I_1^2 \cdot \left(R_r + 0,005 \frac{R_r}{\eta_n} \right) + \kappa^2 R_r \sin^2 \varphi + \right. \\ \left. + \Delta P_{\text{эм.п}} \cdot \left(Q_{\text{см}}^2 \cos^2 \varphi + \kappa^2 L_{\text{ор}}^2 \sin^2 \varphi \right) \cdot \omega_1^2 / \Psi_{\text{см}}^2 \right], \quad (8)$$

где φ – угол загрузки;

R_r, R_s – активные сопротивления роторной и статорной обмоток;

$L_{\text{ор}}, L_m$ – индуктивности рассеяния и намагничивания роторной обмотки;

κ – коэффициент приведения роторной обмотки к статору;

$\Psi_{\text{мн}}$ – номинальное значение амплитуды главного потокосцепления;

ω_1 – угловая скорость главной гармоники I_1 .

Коэффициент теплоотдачи $\lambda(\omega)$ учитывает собой изменение условий теплоотвода для самовентилируемых двигателей при изменении скорости ω ротора [6]. Этот коэффициент можно определить для режима постоянного значения скорости ω при установившейся (максимально допустимой) температуре нагрева статорной обмотки машины в виде отношения отводимых при этом общих электромагнитных потерь $\Delta P_{\text{эм.м}}$ к их значению $\Delta P_{\text{эм.н}}$ при номинальной скорости ($\omega = \omega_n$) двигателя:

$$\lambda(\omega) = \Delta P_{\text{эм.м}} / \Delta P_{\text{эм.н}}. \quad (9)$$

На рисунке 1 приведен общий вид коэффициента теплоотдачи в зависимости от изменения скорости

$$\lambda = \begin{cases} 1, & \text{при } \omega \leq \omega_{\text{н}}; \\ \lambda < 1, & \text{при } \omega > \omega_{\text{н}}; \end{cases}$$

Для неподвижного двигателя ($\omega = 0$) значения λ_0 составляют 0,27-0,49 для закрытого исполнения и 0,13-0,56 для защищенного исполнения [6].

Из условия функционирования для длительных режимов без перегрева самовентилируемого двигателя в асинхронных электроприводах переменного тока с ШИМ, учитывая потери в стали и добавочные потери, можно рассчитать допустимое значение амплитуды основной гармоники $I_{1\text{м}}$ статорного тока при проверке по электромагнитным потерям:

$$I_{1\text{м}} = \left[\frac{\lambda \Delta P_{\text{эм.н}} - \Delta P_{\text{эм.п}}}{\left(R_s + 0,005 \frac{R_r}{\eta_n} \right) + \kappa^2 R_r \sin^2 \varphi + \Delta P_{\text{см.н}} \left(L_m^2 \cos^2 \varphi + \kappa^2 L_{\text{ор}}^2 \sin^2 \varphi \right) \frac{\omega_1^2}{\Psi_{\text{см}}^2}} \right]^{1/2}; \quad (10)$$

при проверке по электрическим потерям:

$$I_{1\text{м}} = \left[\frac{\lambda \Delta P_{\text{э.н}} - \Delta P_{\text{э.п}}}{R_s + \kappa^2 R_r \sin^2 \varphi} \right]^{1/2}. \quad (11)$$

Результаты и обсуждение

По формуле (10) для электродвигателя АИР132М6 рассчитаны (при номинальной частоте основной гармоники статорного тока $\omega_1=1$ о.е., угле загрузки $\varphi = \varphi_n$ и коэффициенте теп-

лоотдачи $\lambda = \lambda(\omega_n) = 1$) максимальные значения основной гармоники $I_{1\text{м}}$ статорного тока, соответствующие работе двигателя в длительном установившемся режиме без теплового перегрева (рис. 2).

На основании полученных зависимостей можно проводить инженерные расчеты проверки по допустимому тепловому нагреву через электромагнитные или электрические потери в самовентилируемых асинхронных электродвига-

телях, работающих в переменных повторяющихся режимах в составе частотно-регулируемых электроприводов переменного тока с ШИМ [7] по следующей методике.

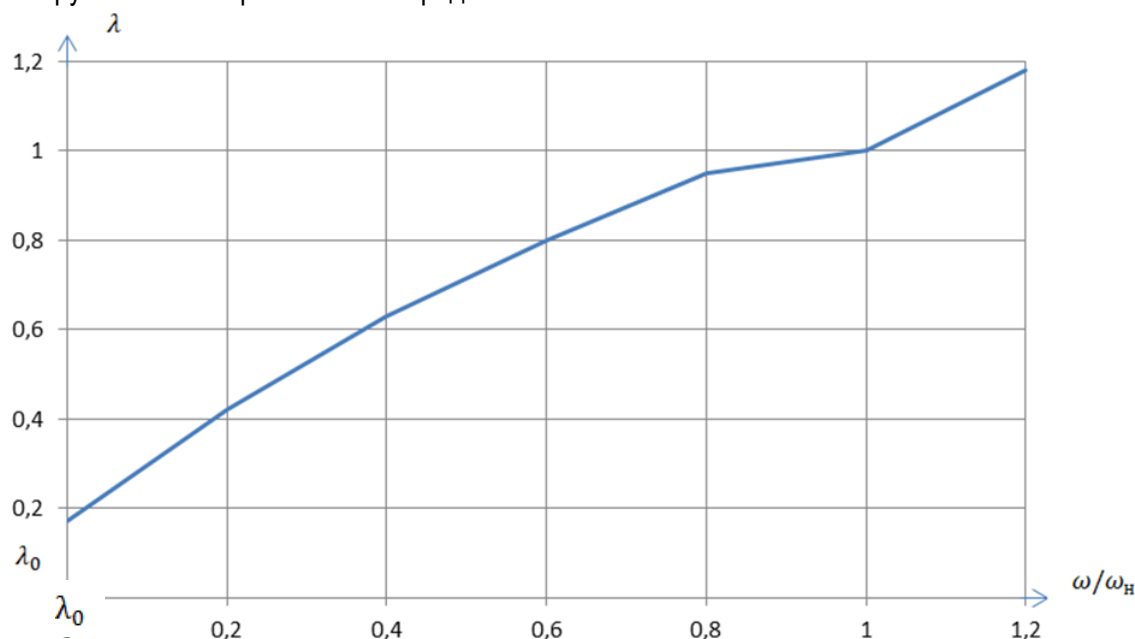


Рис. 1. Изменение коэффициента теплоотдачи для самовентилируемого асинхронного электродвигателя

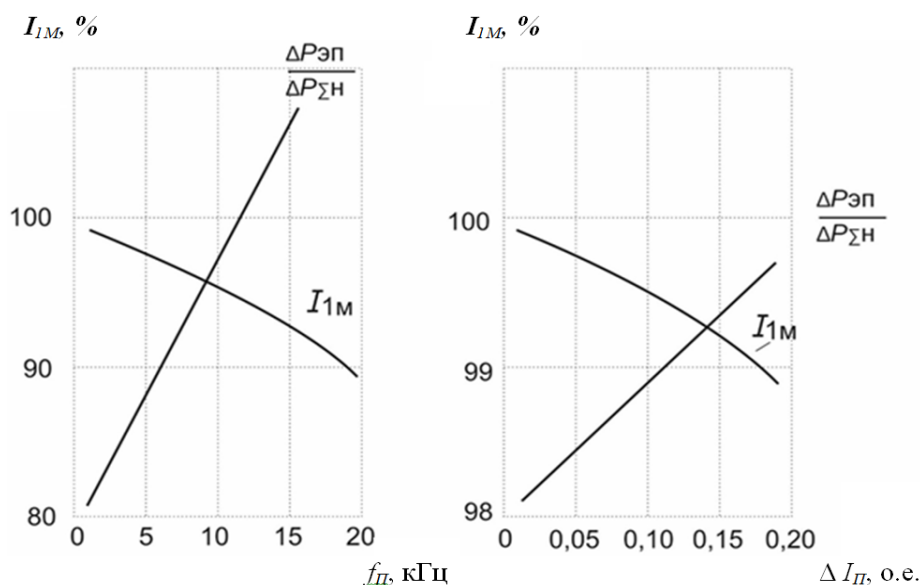


Рис. 2. Изменение модуляционных составляющих электрических и магнитных потерь мощности при максимальном значении основной гармоники статорного тока:

а – для постоянного размаха $\Delta I_n = 0,1 \text{ о.е.} = \text{const}$ пульсаций модуля I_s обобщенного вектора статорного тока; б – при релейном управлении модулем I_s обобщенного вектора статорного тока при изменении ширины (размаха) $\Delta I_n = \text{var}$ токовой трубки

1. По заданной нагрузочной $M(t)$ и скоростной диаграммам $\omega(t)$ электропривода (рис. 3 а) рассчитываются зависимости $I_1(t)$, $|\varphi(t)|$, $|\omega_1(t)|$. На рисунке 3 б изображены расчет-

ные временные характеристики для наиболее распространенного на практике закона частотно-го управления при постоянстве потокосцепления ротора ($\Psi_r = \text{const}$).

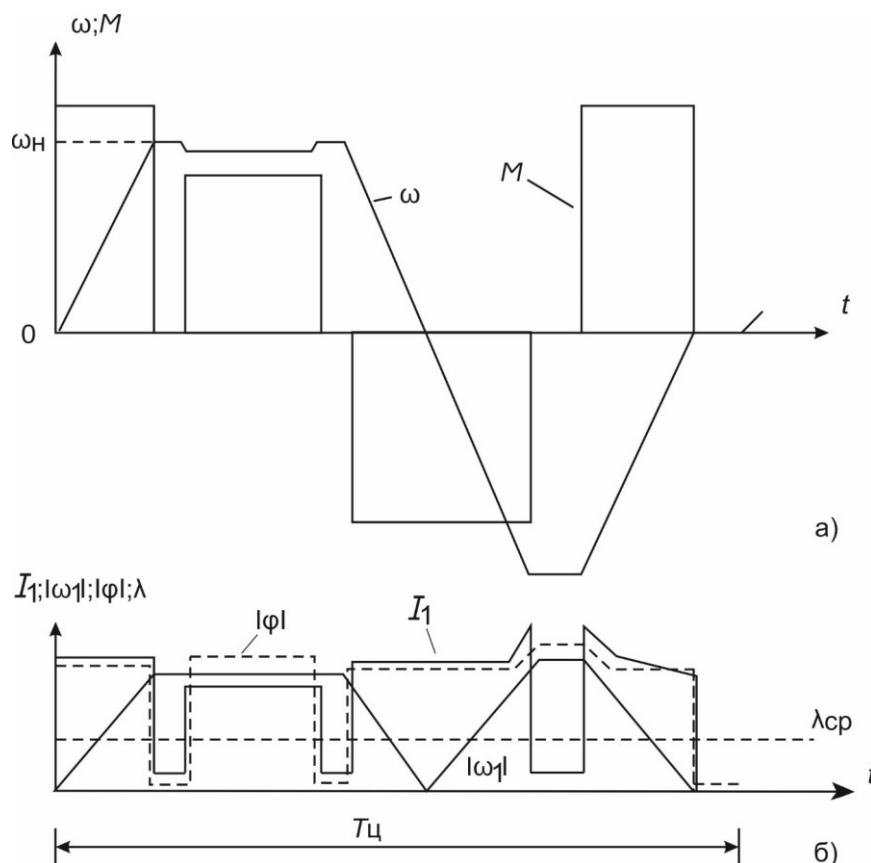


Рис. 3. Временные характеристики параметров режима асинхронного электропривода: а – заданные; б – расчетные

2. Определяется номинальное значение амплитуды Ψ_{mH} главного потокоцепления электродвигателя по формуле:

$$\Psi_{mH} = L_m^2 \cos^2 \varphi_H + k^2 L_{\sigma r}^2 \sin^2 \varphi_H. \quad (12)$$

3. По кривой изменения коэффициента теплоотдачи $\lambda(\omega)$ определяется текущее значение коэффициента теплоотдачи $\lambda(t)$, и по формуле

$$\lambda_{\text{ср}} = 1/T_{\text{ц}} \int_0^{T_{\text{ц}}} \lambda(t) dt \quad (13)$$

вычисляется средний за время рабочего цикла коэффициент теплоотдачи (рис. 3 б).

4. Рассчитываются усредненные значения за время рабочего цикла основных составляющих электрических $\Delta P_{\text{э.1}}$ или электромагнитных $\Delta P_{\text{эм.1}}$ потерь мощности. Также определяются модуляционные составляющие электрических или электромагнитных потерь мощности двигателя:

$$\Delta P_{\text{э.п}} = \sigma (R_s + k^2 R_r) \Delta I_{\text{п}}^2; \quad (14)$$

$$\Delta P_{\text{эм.п}} = \Delta I_{\text{п}}^2 [\sigma (R_s + k^2 R_r) + k^2 \Delta P_{\text{см.н}} L_{\sigma r}^2 (f_{\text{п}}/50)^{1.3} \cdot 1/4 \Psi_{mH}^2], \quad (15)$$

где $\sigma = 1/12$ – для машин небольшой мощности;

$$\sigma = 1/12 \left(f_{\text{п}}/50 \right) \quad \text{– для машин средней и большой мощности.}$$

5. Из выражения (6) через среднее значение $\lambda_{\text{ср}}$ определяется допустимое значение отводимых из самовентилируемого двигателя электрических $\Delta P_{\text{э.м.}}$ или электромагнитных $\Delta P_{\text{эм.м.}}$ потерь мощности.

6. Проверить условия работы электродвигателя без теплового перегрева возможно из выражений (3) и (4) соответственно через электромагнитные или электрические потери.

При невыполнении условий (3) и (4) целесообразно выбрать более мощную машину или уменьшить ее среднюю токовую нагрузку [8] в рабочем цикле механизма (уменьшить темп разгона и торможения привода или увеличить интервалы времени между циклами) и повторить проверку на нагрев с новыми значениями основной гармоники $I_1(t)$ статорного тока и времени рабочего цикла $T_{\text{ц}}$.

Разработанная методика проверки по допустимому нагреву самовентилируемых асинхронных машин, питаемых от статических преобразователей с ШИМ [9], основана на методе экви-

валентных средних потерь [10] и применима к циклическим режимам работы со следующими соотношениями времени цикла $T_{\text{ц}}$ и постоянной времени нагрева машины $T_{\text{н}}$:

$$T_{\text{ц}} \ll T_{\text{н}}.$$

При этом значения постоянной времени нагрева могут составлять для асинхронных машин от 10 до 100 мин. [6], хотя на практике достаточно вполне выполнение условия $\frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{н}}} \leq 0,2$ [5].

Выводы

Из условия непревышения допустимого перегрева частотно-регулируемого асинхронного двигателя в длительных стационарных режимах [11] необходимо из-за наличия модуляционных потерь мощности уменьшать максимальную загрузку двигателя основной гармоникой I_1 статорного тока, развивающей электромагнитный момент двигателя.

Как видно из рисунка 3 а, б, для асинхронных машин средней мощности, наиболее широко используемых в сельскохозяйственных предприятиях, при работе с номинальной частотой основной гармоники статорного тока ($\omega_1 = 1$ о.е.) и величиной размаха пульсаций модуля обобщенного вектора статорного тока $\Delta I_{\text{п}}$ не более 0,1 о.е. целесообразно снижать максимальную загрузку двигателя основной гармоникой $I_{1\text{м}}$ статорного тока в пределах до 10%.

Для самовентилируемых асинхронных машин в связи с ухудшением возможностей теплоотвода потерь мощности с уменьшением скорости ротора ниже номинального значения целесообразно дополнительно снижать загрузку [12] таких машин основной гармоникой $I_{1\text{м}}$ статорного тока. При выполнении расчетов по формуле (11) для электродвигателя АИР132 М6 мощностью 7,5 кВт принимались следующие значения коэффициента теплоотдачи неподвижного электродвигателя защищенного исполнения $\lambda = 0,15$ (рис. 1), размах пульсаций модуля статорного тока $\Delta I_{\text{п}} = 0,1$ о.е. и среднее значение модуляционной частоты $f_{\text{п}} = 5$ кГц преобразователя частоты с ШИМ.

Результаты расчетов применительно к закону оптимального частотного управления электроприводом по минимуму статорного тока (соответствует угол нагрузки $|\varphi| = \pi/4$) показыва-

ют, что в длительном стационарном режиме следует во избежание теплового перегрева уменьшить при скоростях, близких к нулю загрузку такой машины основной гармоникой статорного тока, до значений в пределах $I_{1\text{м}} \leq 0,29$ о.е., что заметно понижает значения электромагнитного момента машины в пределах $M \leq 0,171 M_{\text{н}}$, но зато не приводящего в длительном режиме к перегреву машины, что особенно актуально при работе в тяжелых условиях на животноводческих предприятиях, зерновых комплексах в период сева и уборочной. Хочется отметить, что закон частотного управления по минимуму статорного тока характеризуется (при равных амплитудах основной гармоники статорного тока) наибольшим значением создаваемого электромагнитного момента при всех других законах частотного управления. При расчетах исходя из $\lambda = 0,3$ (что соответствует закрытому исполнению используемого двигателя) максимальные значения основной гармоники статорного тока и развиваемого электромагнитного момента двигателя при работе в длительном стационарном режиме без перегрева на скоростях близких к нулю увеличиваются примерно в 2 раза и составляют $I_{1\text{м}} = 0,49$ о.е. и $M = 0,392 M_{\text{н}}$.

При инженерных расчетах по проверке допустимого теплового перегрева частотно-управляемого двигателя необходимо учитывать изменение условий теплоотвода потерь мощности для машины в зависимости от скорости ротора [12], что осуществляется с помощью коэффициента теплоотдачи $\lambda(\omega)$ машины.

Библиографический список

1. Браславский, И. Я. Асинхронный энергосберегающий электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – Москва: Академия, 2004. – 256 с. – Текст: непосредственный.
2. Кузнецов, А. Ю. Идентификация внутренних параметров асинхронного электродвигателя / А. Ю. Кузнецов, И. Ю. Александров, М. В. Кокшарова. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-231-1-106-111. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1 (231). – С. 106-111.
3. Некрасов, А. А. Исследование эксплуатационных показателей режимов диагностирова-

ния электродвигателей / А. А. Некрасов, А. И. Некрасов. – Текст: непосредственный // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. № 2 (35). – С. 26-32.

4. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением / Г. Г. Соколовский. – Москва: ИЦ «Академия», 2006. – 272 с. – Текст: непосредственный.

5. Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotela D., et al. (2024). Harmonic measurement and analysis for characterization of adjustable speed drives. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Vol. 162, Nov. 2024. 110217. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110217>.

6. Маклаков, А. С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник / А. С. Маклаков. – Текст: непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 92-100. – EDN: LAVJUD.

7. Tong Li-li, Ding Tong-gan, Li Xing-ming. (2021). Cooling Structure and Thermal Analysis of Electric Motor Controller for Vehicle. *China National Knowledge Infrastructure (CNKI) Small and Special Electrical Machines*. 49 (11): 30-33.

8. Сандлер, А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – Москва: Энергия, 1974. – 328 с. – Текст: непосредственный.

9. Еремочкин С. Ю. Разработка и исследование однофазного асинхронного электропривода сельскохозяйственной машины с полупроводниковым устройством регулирования скорости / С. Ю. Еремочкин, Д. В. Дорохов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 10 (216). – С. 89-99.

10. Шрейнер, Р. Т. Математической моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: РАН Уральское отделение, 2000. – 653 с. – Текст: непосредственный.

11. Олещук, В. И. Нелинейные законы регулирования электропривода с разомкнутыми обмотками асинхронного электродвигателя на базе четырех ШИМ-инверторов / В. И. Олещук. – Текст: непосредственный // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 1 (33). – С. 8-14. – EDN: YLOUHX.

12. Nacamura T., Ogama Y. (2024). Relationship between the induced voltage of a rotor bar and the rotation characteristics of a high-temperature superconducting induction motor. *Journal of Applied Physics*. 136, 093903. <https://doi.org/10.1063/5.0219918>.

References

1. Braslavskiy I.YA. Asinkhronnyy energosberegayushchiy elektroprivod / I.YA. Braslavskiy, Z.SH. Ishmatov, V.N. Polyakov. – Moskva: Akademiya, 2004. – 256 s.

2. Kuznetsov A.YU. Identifikatsiya vnutrennikh parametrov asinkhronnogo elektrodvigatelya / A.YU. Kuznetsov, I.YU. Aleksandrov, M.V. Koksharova // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – No. 1 (231). – S. 106-111.

3. Nekrasov A.A. Issledovanie ekspluatatsionnykh pokazateley rezhimov diagnostirovaniya elektrodvigatelya / A.A. Nekrasov, A.I. Nekrasov // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. – 2019. – No. 2 (35). – S. 26-32.

4. Sokolovskiy G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem / G.G. Sokolovskiy. – Moskva: ITS "AkademiYA", 2006. – 272 s.

5. Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotela D., et al. (2024). Harmonic measurement and analysis for characterization of adjustable speed drives. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Vol. 162, Nov. 2024. 110217. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110217>.

6. Maklakov A.S. Gibridnyy algoritm modulyatsii na osnove prostranstvenno-vektornoy SHIM i SHIM s udaleniem vydelennykh garmonik // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta.

Seriya Energetika. – 2018. – Т. 18. – No. 1. – S. 92-100.

7. Tong Li-li, Ding Tong-gan, Li Xing-ming. (2021). Cooling Structure and Thermal Analysis of Electric Motor Controller for Vehicle. *China National Knowledge Infrastructure (CNKI) Small and Special Electrical Machines*. 49 (11): 30-33.

8. Sandler A.S. Avtomaticheskoe chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami / A.S. Sandler, R.S. Sarbatov. – Moskva: Energiya, 1974. – 328 s.

9. Eremochkin S.YU. Razrabotka i issledovanie odnofaznogo asinkhronnogo elektroprivoda selskokhozyaystvennoy mashiny s poluprovodnikovym ustroystvom regulirovaniya skorosti / S.YU. Eremochkin, D.V. Dorokhov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – No. 10 (216). – S. 89-99.

10. Shreyner R.T. Matematicheskoy modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty / R.T. Shreyner. – Ekaterinburg: RAN Uralskoe otделение, 2000. – 653 s.

11. Oleshchuk V.I. Nelineynye zakony regulirovaniya elektroprivoda s razomknutymi obmotkami asinkhronnogo elektrodvigatelya na baze chetyrekh SHIM-invertorov // Problemy regionalnoy energetiki. – 2017. – No. 1 (33). – С. 8-14.

12. Nacamura T., Ogama Y. (2024). Relationship between the induced voltage of a rotor bar and the rotation characteristics of a high-temperature superconducting induction motor. *Journal of Applied Physics*. 136, 093903. <https://doi.org/10.1063/5.0219918>.

