

УДК 681.52

Защита электродвигателей при несинусоидальном питании

Дубовик В.Г., Лебедев Л.Н., Гавалешко С.С. Шевчук А.П.

Асинхронные трехфазные электродвигатели напряжением до 500 В при мощностях от 0,05 до 400 кВт являются наиболее распространенными. Надежная и бесперебойная их работа обеспечивается, в первую очередь, надлежащим выбором по номинальной мощности, режиму работы и форме исполнения.

Даже для правильно спроектированных и эксплуатируемых электроприводов при их работе всегда остается вероятность появления ненормальных, аварийных режимов. К аварийным режимам относятся:

а) многофазные и однофазные короткие замыкания в обмотках электродвигателя; в выводной коробке, на контактах коммутационных аппаратов, короткие замыкания фазы на корпус или нулевой провод внутри двигателя или во внешней цепи;

б) тепловые перегрузки электродвигателя из-за прохождения по его обмоткам повышенных токов по технологическим причинам, тяжелых условиях пуска под нагрузкой, длительном понижении напряжения, исчезновении одной из фаз силовой цепи, механических повреждениях, а также при ухудшении условий его охлаждения.

Тепловые перегрузки вызывают в первую очередь ускоренное старение и разрушение изоляции двигателя и преждевременному выходу его из строя.

Работа при аварийных режимах ведет к повышенному энергопотреблению из сети, увеличению потребляемой реактивной мощности [1]. Согласно исследованиям, длительная работа двигателя с токовым перегрузом всего лишь на 5% от номинального значения, сокращает срок его службы в 10 раз. В связи с высокой несинусоидальностью кривой тока, особенно во время пусков, в ней присутствует большое количество гармоник высшего порядка, оказывающих существенное влияние на значения величины действующего тока [2].

Одной из тенденций в области энергосберегающих технологий последних лет является применение частотно-регулируемых приводов на основе асинхронных короткозамкнутых электродвигателей и полупроводниковых преобразователей частоты, снижающих потребление электрической энергии, повышающих возможности автоматизации, удобство эксплуатации оборудования и качество технологических процессов.

Стандартные асинхронные короткозамкнутые самовентилируемые электродвигатели (АД) наиболее распространены в промышленности. Это обусловлено простотой их конструкции, очень высокой надежностью в эксплуатации и высоким коэффициентом полезного действия. Фактически они имеют только два недостатка: большой пусковой ток ($I_{пуск} = (5÷7) I_{ном.}$) и ограниченные возможности регулирования частоты вращения.

Двигатель работает с уменьшенным магнитным потоком на частотах ниже номинальной. Он имеет меньший критический момент, чем при линейном соотношении U/f , и создает меньше шума. Квадратичное соотношение $(U/f)^2$ используется для приводов, в которых требуемый момент пропорционален квадрату скорости. Таковыми являются центробежные вентиляторы и насосы.

Выходные токи и напряжения преобразователя частоты в отличие от стандартной сети имеют несинусоидальную форму, а пики, высшие гармоники тока и напряжения, быстрое изменение частоты и напряжения во времени приводит к увеличению напряжения на изоляции двигателя, увеличиваются его потери, вибрация и шум. Так, как техническим условием завода-изготовителя не предусматриваются испытания стандартного асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты, появляется необходимость в проведении дополнительных его проверок [3].

Гармонические компоненты напряжения преобразователя частоты увеличивают

уровень магнитного шума двигателя. Частотный диапазон магнитных силовых волн, созданный в двигателе при питании от преобразователя частоты, настолько широк, что возможно возникновение резонанса в двигателе.

Поток воздуха и охлаждающая мощность зависят от частоты вращения вентилятора. Чтобы увеличить охлаждающую мощность двигателя при низкой частоте вращения, может быть использован отдельный вентилятор с постоянной максимальной частотой вращения.

Коэффициент 25-й гармонической составляющей напряжения сети питания 380 В допускается равным 1,5%. Искажения напряжения, вносимые преобразователем частоты во входящую электрическую цепь, оценивают коэффициентом искажения k_{BX} в процентах, который вычисляется по формуле

$$k_{BX} = \sqrt{k_1^2 - k_0^2},$$

где k_0 - коэффициент искажения синусоидальности кривой на выходе источника электроэнергии; k_1 - коэффициент искажения синусоидальности кривой в процентах, на выходе источника электроэнергии за нормированный интервал времени при включенном преобразователе частоты. Определение гармонических составляющих выходного напряжения преобразователя частоты с переменной частотой выходного напряжения осуществляют до 15-й гармоники, если другие значения не указаны в технических условиях на преобразователь [4].

Преобразователи частоты, инверторы которых выполнены на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT), имеют амплитуды импульсов выходного напряжения, независимо от выходной частоты, приблизительно в 1,5 раза превышающие напряжение сети с очень коротким временем нарастания. Напряжение на зажимах двигателя, в зависимости от свойств его кабеля, может почти удваиваться.

Фильтры типа dU/dt подавляют пики выходного напряжения преобразователя частоты и быстрые изменения напряжения, которые негативно действуют на изоляцию электродвигателя. Кроме того, фильтры dU/dt уменьшают высокочастотное излучение кабеля электродвигателя, высокочастотные потери и токи в подшипниках электродвигателя, а также они используются с двигателями, у которых величина диэлектрического сопротивления изоляции неизвестна или недостаточна. Необходимость применения фильтра dU/dt определяется классом изоляции электродвигателя.

Тепловая защита электродвигателя, основанная только на тепловой модели, не обеспечивает стопроцентную точность, потому, что температура двигателя только рассчитывается, но не измеряется, а также не учитывается изменение температуры окружающей среды. Если работают несколько двигателей от преобразователя частоты, в каждом из них должен быть установлен отдельный термисторный датчик. Возможно ошибочное срабатывание термисторного датчика в результате воздействия высших гармоник напряжения на выходе преобразователя частоты, в общем случае защитой от этого является увеличение уставки срабатывания реле защиты примерно на 10%.

Одно из важнейших требований к устройствам защиты двигателей - четкое действие ее при аварийных и ненормальных режимах работы двигателей и вместе с тем недопустимость ложных срабатываний. Поэтому аппараты защиты должны быть правильно выбраны и тщательно отрегулированы.

Недостатком устройства [6] являются низкие функциональные возможности, связанные с отсутствием контроля потерь мощности в электродвигателе с учетом действия высших гармоник напряжения и тока при разных значениях частоты вращения его вала.

Предлагаемое устройство защиты позволяет, путем введения дополнительных элементов, обеспечить контроль потерь мощности в электродвигателе с учетом действия

высших гармоник напряжения и тока при разных значениях частоты вращения вала и его отключении при превышении величины текущих потерь допустимого значения.

На рис. 1 представлена структурная схема устройства защиты асинхронного электродвигателя при несинусоидальном питании [7].

Устройство защиты асинхронного электродвигателя 1 при несинусоидальном питании (рис. 1) состоит из блока 2 датчиков тока, три входа которого соединены с тремя выходами преобразователя частоты 3, а три первые выходы с фазными цепями асинхронного электродвигателя 1, блок 4 вентилятора соединен через ключевой элемент 5 с выходом блока 6 независимой выдержки времени, датчик 7 скорости, который имеет связь с электродвигателем 1, соединен через блок 8 определения производительности обдува со вторым входом второго порогового элемента 9, блок 10 гальванической развязки тремя входами подключен к фазным цепей электродвигателя 1, а тремя выходами соединен с тремя входами блока 11 определения коэффициента несинусоидальности

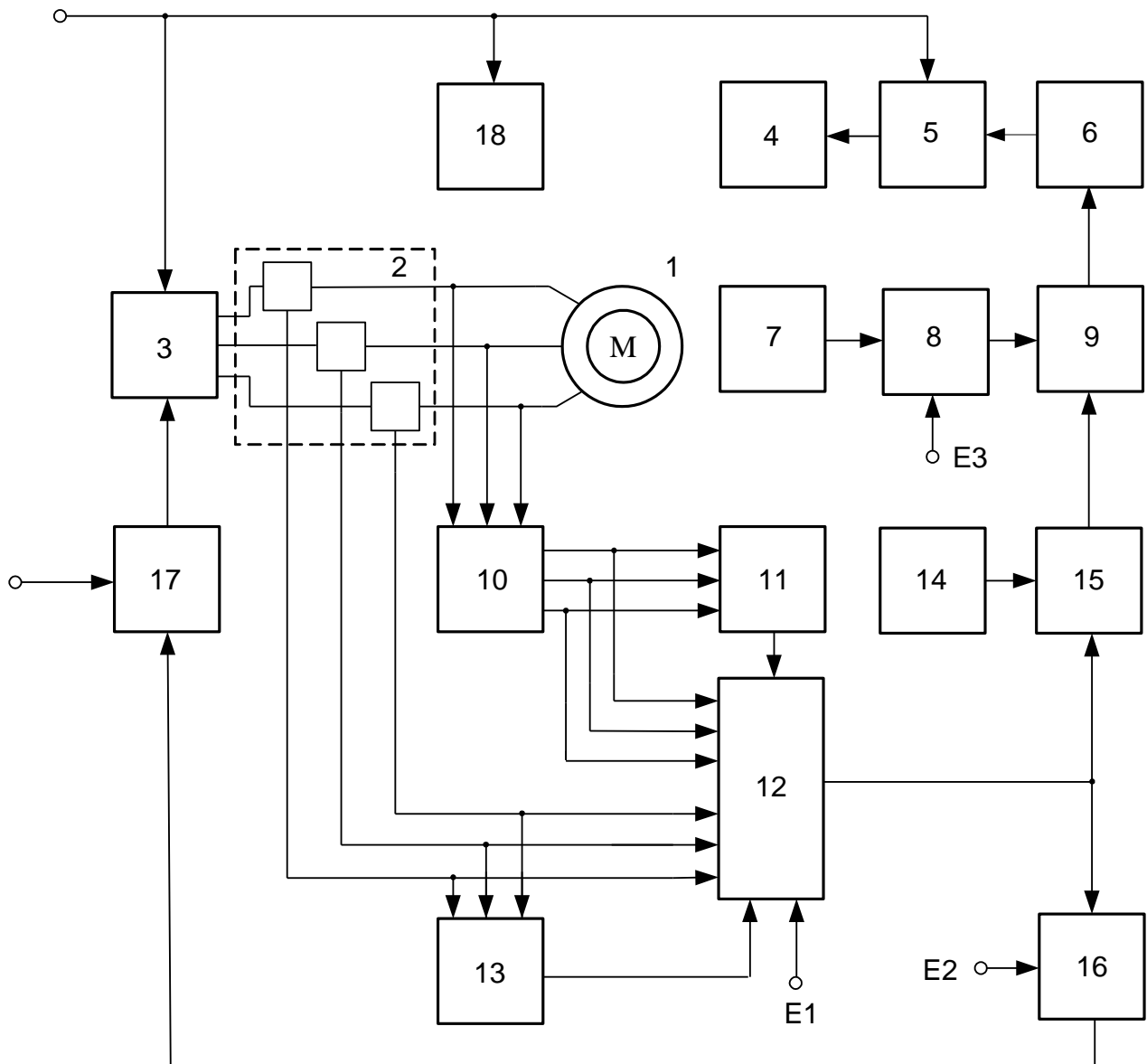


Рис. 1. Структурная схема устройства защиты асинхронного электродвигателя при несинусоидальном питании

(THD_U) напряжения и четвертым, пятым, шестым входами блока 12 определения потерь мощности, первые три входа которого соединены с тремя вторыми выходами блока 2 датчиков тока и входами блока 13 определения коэффициента несинусоидальности (THD_I) тока, выход которого соединен с восьмым входом блока 12 определения потерь мощности, выход датчика 14 температуры соединен со входом блока 15 определения теплоотвода, седьмой вход блока 12 определения потерь мощности соединен с выходом блока 11 определения коэффициента несинусоидальности (THD_U) напряжения, а выход соединен со вторым входом блока 15 определения теплоотвода и входом первого порогового элемента 16, выход которого через элемент И 17 соединен со входом преобразователя частоты 3, второй вход которого соединен с цепью сети питания, блоком 18 питания и с входом ключевого элемента 5, выход порогового элемента 9 соединен с входом блока 6 независимой выдержки времени, а вход с выходом блока 15 определения теплоотвода. Три источника E_1, E_2, E_3 постоянного входного воздействия соединены, соответственно, с девятым входом блока 12 определения потерь мощности, со вторым входом первого порогового элемента 16, с вторым входом блока 8 определения производительности обдува.

Блок 2 датчиков тока может быть выполнен с использованием трех датчиков тока, например, датчиков тока на эффекте Холла и обеспечивает формирование выходного сигнала пропорционального мгновенному значению тока в цепях питания электродвигателя. Такие датчики производит фирма LEM. Цепи питания датчиков тока на эффекте Холла не показаны.

Блок 5 вентилятора может быть выполнен с использованием вентилятора с приводом от отдельного электродвигателя и обеспечивает подачу воздуха для дополнительного охлаждения электродвигателя 1 при снижении частоты вращения его вала. Производительность блока 5 вентилятора близка к производительности колеса вентилятора электродвигателя 1.

Датчик 7 скорости может быть выполнен с использованием электрической машины или преобразователя импульсной последовательности в частоту вращения, который контактно или бесконтактно связан с валом электродвигателя и обеспечивает формирование выходного сигнала, пропорционального частоте вращения вала электродвигателя 1.

Блок 8 определения производительности обдува может быть выполнен с использованием функционального преобразователя и обеспечивает формирование выходного сигнала U_8 при изменении сигнала датчика скорости U_7 относительно номинального значения $U_{7н}$ и реализует зависимость $U_8 = E_3 \cdot U_7 / U_{7н}$.

Блок 10 гальванической развязки может быть выполнен с использованием элементов с электромагнитными или оптическими каналами развязки и обеспечивает высокий импеданс между его входными и выходными цепями без электрической связи.

Блок 11 определения коэффициента несинусоидальности (THD_U) напряжения может быть выполнен с использованием анализатора спектра, формирователя коэффициента несинусоидальности напряжения и обеспечивает формирование выходного сигнала в соответствии с выражением

$$THD_U = \frac{\sqrt{U^2(2) + U^2(3) + \dots + U^2(n)}}{U_1(1)} = \frac{U_\Sigma}{U_1(1)}$$

где $U(1) \dots U(n)$ - эффективные значения напряжения первой ... n гармоник,

$U\Sigma$ - эффективное значение напряжения всех высших гармоник, THD_U (*Total Harmonic Distortion*) - коэффициент несинусоидальности напряжения.

Блок 12 определения потерь мощности ΔP_δ в электродвигателе 1 может быть выполнен с использованием функциональных узлов, преобразователей сигналов, которые обеспечивают определения потерь мощности с учетом значения E_1 , а также того, что $U_{I2} = \Delta P_\delta$. Номинальные значения величин для определения $U_{I2} = \Delta P_\delta$ вводятся в блок 12, цепи для их ввода не приведены, кроме номинального значения мощности, которая пропорциональна амплитуде источника постоянного входного воздействия E_1 .

Выходные токи и напряжения преобразователя частоты в отличие от стандартной сети имеют несинусоидальную форму, что приводит к увеличению потерь электродвигателя. Индуктивное сопротивление обмоток асинхронного электродвигателя влияет на импульсную форму напряжения так, что через обмотки проходит ток I_1 с формой, близкой к синусоиде

$$I_1 = \sqrt{\sum_{v=1}^n I_{1v}^2}$$

где I_{1v} - действующее значение тока v - той гармоники.

Каждая из составляющих суммарных потерь представляют: электрические, магнитные, механические, дополнительные, потери от высших гармоник и зависят от режима работы электродвигателя. Суммарная мощность потерь энергии в асинхронном двигателе с несинусоидальной формой напряжения питания при частотном способе регулирования скорости определяется по формуле

$$\Delta P_\delta = \Delta P_{I_m} + \Delta P_{2m} + \Delta P_{I_{c2}} + \Delta P_{I_{cв}} + \Delta P_{mex} + \Delta P_{дооб} + \Delta P_v,$$

где ΔP_{I_m} - потери в меди обмоток статора, определяемые первыми гармониками токов; ΔP_{2m} - потери в проводниках обмоток ротора, определяемые первыми гармониками токов; $\Delta P_{I_{c2}}$ - потери в стали статора от гистерезиса; $\Delta P_{I_{cв}}$ - потери в стали статора от вихревых токов; ΔP_{mex} - механические потери; $\Delta P_{дооб}$ - дополнительные потери; ΔP_v - потери от высших гармоник.

Для расчета потерь в обмотках электродвигателя используются следующие формулы

$$\begin{aligned} \Delta P_{I_m} &= \Delta P_{I_m \text{ ном}} \cdot I_{11}^2 / I_{11 \text{ ном}}^2; \\ \Delta P_{2m} &= \Delta P_{2m \text{ ном}} \cdot I_2^2 / I_{2 \text{ ном}}^2, \end{aligned}$$

где $\Delta P_{I_m \text{ ном}}$ - номинальные потери в меди обмоток статора, определяемые первыми гармониками токов; $\Delta P_{2m \text{ ном}}$ - номинальные потери в проводниках обмоток ротора, определяемые первыми гармониками токов; I_{11} , I_2 - значения модулей результирующих векторов токов обмоток статора и ротора; $I_{11 \text{ ном}}$, $I_{2 \text{ ном}}$ - значения модулей результирующих векторов токов обмоток статора и ротора в номинальном режиме.

Потери в стали статора на гистерезис $\Delta P_{I_{c2}}$ и вихревые токи $\Delta P_{I_{cв}}$ зависят от частоты вращения и потока двигателя

$$\begin{aligned} \Delta P_{I_{c2}} &= \Delta P_{I_{c2 \text{ ном}}} \cdot \psi_0^2 \omega_1 \cdot (1 + THD_u) / \psi_{0 \text{ ном}}^2 \omega_{1 \text{ ном}}; \\ \Delta P_{I_{cв}} &= \Delta P_{I_{cв \text{ ном}}} \cdot \psi_0^2 \omega_1 \cdot (1 + THD_u) / \psi_{0 \text{ ном}}^2 \omega_{1 \text{ ном}} \end{aligned}$$

где ψ_0 - значение модуля результирующего вектора главного потокосцепления; $\psi_{0 \text{ ном}}$ - номинальное значение модуля результирующего вектора главного потокосцепления; ω_1 - круговая частота напряжения статора; $\omega_{1 \text{ ном}}$ - круговая частота напряжения статора в номинальном режиме; THD_U - коэффициент несинусоидальности по напряжению.

Потери ΔP_v от высших гармоник определяются по выражению

$$\Delta P_v = 1,5 \sum_{v=2}^n I_{1v} U_{1v}$$

где I_{1v} - амплитуда активной составляющей фазного тока статора v -той гармоники; U_{1v} -

амплитуда фазного напряжения двигателя ν -той гармоники.

Потери в двигателе от высших гармоник зависят от соотношения между несущей частотой и частотой модуляции и могут быть оценены через коэффициент K_{cn} искажения по току или обратной величине - коэффициентом K_n перегрузки $K_{cn} = I_{11} / I_1$, $K_n = I_1 / I_{11}$, где I_1 - полный действующий ток фазы статора.

Для определения I_1 можно использовать выражение $I_1 = I_{11} + I_{11} THD_I$, где THD_I (Total Harmonic Distortion) - коэффициент несинусоидальности тока.

Блок 13 определения коэффициента несинусоидальности (THD_I) тока может быть выполнен с использованием анализатора спектра, формирователя коэффициента несинусоидальности тока и обеспечивает формирование выходного сигнала в соответствии с выражением

$$THD_I = \frac{\sqrt{I^2(2) + I^2(3) + \dots + I^2(n)}}{I_1(1)} = \frac{I_\Sigma}{I_1(1)}$$

где $I(1) \dots I(n)$ - эффективные значения тока первой ... n гармоник,

Блок 15 определения теплоотвода может быть выполнен с использованием функционального преобразователя и обеспечивает определение значения подачи воздуха G_n для теплоотвода $U_{15} = U_{12} / k \cdot (U_{t_n} - U_{14})$, с учетом выражения

$$G_n = \Delta P_0 / C_n \cdot (t_n - t), \text{ м}^3/\text{час},$$

где ΔP_0 - потери мощности в электродвигателе 1, Вт; C_n - удельная теплоемкость воздуха, 0,35 Вт · ч / м³ · град; t_n - значение температуры электродвигателя 1 при номинальном режиме работы, град; t - текущее значение температуры воздуха для охлаждения; k - коэффициент, пропорциональный C_n .

Номинальные значения величин k и U_{t_n} , также пропорциональной t_n вводятся в блок 15, а цепи для их ввода не приведены.

Принятые обозначения U_n^i - амплитуда сигнала на i -м выходе n -го блока.

Работает устройство следующим образом. После подачи напряжения в силовые цепи подается также напряжение на блок питания 18 и на второй вход преобразователя частоты 3. Нажимается кнопка ПУСК (не показана) и сигнал логической единицы подается на второй вход элемента И 17, на его выходе также устанавливается уровень логической единицы, который подается на преобразователь частоты 3 и обеспечивается разгон электродвигателя 1. При его работе сигналы с блока 2 датчиков тока подаются на блок 13 определения коэффициента несинусоидальности (THD_I) тока и на блок 12 определения потерь мощности, на входы которого подаются также сигналы, пропорциональные напряжению питания, от блока 10 гальванической развязки, тремя входами подключенного к фазным цепям электродвигателя 1. От блока 10 гальванической развязки сигналы подаются также на блок 11 определения коэффициента несинусоидальности (THD_U) напряжения, с выхода которого подается сигнал U_{11} , пропорциональный значению THD_U , который зависит от амплитуд высших гармоник, на седьмой вход блока 12, на восьмой вход которого подается сигнал, который также зависит от амплитуд высших гармоник, пропорциональный значению THD_I от блока 13. На выходе блока 12 появляется сигнал, пропорциональный значению потерь мощности в электродвигателе 1, который подается на блок 15 определения теплоотвода и на пороговый элемент 16 с характеристикой

$$U_{16} = \begin{cases} 1, & \text{при } U_{12} < E_2 \\ 0, & \text{при } U_{12} \geq E_2, \end{cases}$$

где E_2 - напряжение, пропорциональное допустимым потерям мощности в электродвигателе.

На вход блока 15 подается также сигнал, пропорциональный температуре воздуха

охлаждения электродвигателя 1, от датчика 14 температуры, а на выходе его появляется сигнал U_{15} , пропорциональный значению воздуха для теплоотвода, который подается на пороговый элемент 9 с характеристикой

$$U_9 = \begin{cases} 1, & \text{при } U_{15} \geq U_8 \\ 0, & \text{при } U_{15} < U_8. \end{cases}$$

При $U_9 = 0$ выходной сигнал блока 6 независимой выдержки времени также равен нулю и он подается на ключевой элемент 5. При этом он остается разомкнутым и на блок 4 вентилятора напряжение питания не подается. Ключевой элемент 5 замыкается при условии подачи на его вход от блока 6 сигнала логической единицы. Для остановки электродвигателя 1 сигнал цепи ПУСК на входе элемента И 17 переводится в ноль и на его выходе устанавливается также ноль, что приводит к отключению преобразователя частоты 3 и снятия напряжения с его трех выходов, электродвигатель 1 останавливается.

Высшие гармоники вызывают увеличение потерь в статоре и роторе электродвигателя. Дополнительные потери мощности повышают температуру, появляются локальные места перегрева, появляются дополнительные моменты на частотах высших гармоник, которые могут привести к ощутимым вибрациям электродвигателя. Температуру обмотки электродвигателя можно представить в следующем виде $T_{обм} = T_{окр} + \theta$ °K, где $T_{окр}$ - температура окружающей среды, которая охлаждает обмотку двигателя, град; θ - превышение температуры обмотки над температурой среды, град.

Закон изменения $T_{обм}(t)$ зависит от изменения $T_{окр}(t)$ и $\theta(t)$. На практике функция $T_{окр}(t)$ определяется по данным датчика 14 температуры воздуха, который устанавливается вблизи блока вентилятора 4. Аналитическое выражение функции $\theta(t)$ определяется из уравнения теплового состояния обмоток

$$\Delta P_{\theta} dt = C d\theta + A \theta dt,$$

где ΔP_{θ} - мощность потерь в электродвигателе, которые вызывают нагрев его обмоток, Вт; C - теплопроводность обмоток, Дж/град; A - теплоотдача обмоток, Дж/(град·сек); t - время, сек.

При работе двигателя с постоянной нагрузкой, измеряемой мощностью P решение уравнения имеет вид

$$\theta = \theta_0 + (\theta_y - \theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \text{ град,}$$

где θ_0 - начальное превышение температуры; $\theta_y = P/A$ - постоянное превышения температуры; $\tau = C/A$ - постоянная времени нагрева.

При перегрузке электродвигателя 1 или при управлении задается от преобразователя частоты 3 частота вращения вала ниже номинальной, то потери мощности возрастают, а производительность колеса обдува электродвигателя снижается. При этом выходной сигнал блока 12 возрастает, что приводит к росту сигнала на выходе блока 15, кроме того сигнал на выходе блока 8 уменьшается и это приводит к переключению порогового элемента 9, на выходе которого устанавливается уровень логической единицы. С задержкой, установленной для блока 6, на его выходе устанавливается уровень логической единицы, что приводит к замыканию ключевого элемента 5, который обеспечивает подачу питания на блок 4 вентилятора, который запускается и создает дополнительный обдув электродвигателя 1 заблаговременно, не допуская его перегрев. При уменьшении потерь мощности или повышении частоты вращения вала электродвигателя, пороговый элемент 9 переключается в обратное состояние, что приводит к размыканию ключевого элемента 5 и отключению блока 4 вентилятора от сети. Такой режим дополнительного обдува электродвигателя 1 предотвращает его перегрев, а режим работа блока 4 вентилятора обеспечивает энергоэффективный режим его использования.

В случае значительного роста потерь мощности электродвигателя 1, выходной сигнал U_{12} блока 12 превышает уровень амплитуды E_2 на втором входе порогового элемента 16 и его выходной сигнал переходит в нулевой уровень, что приводит через элемент И 17 до нулевого уровня на входе преобразователя частоты 3, который обеспечивает отключение выходного напряжения, что ведет к остановке электродвигателя 1.

Использованные источники:

1. Патент Украины № 7650. Дубовик В., Аглиулин В.Ф., Калинчик В.П. Устройство защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы. Н02Н 7/09. Бюл. № 4. 26.12.95.

2. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты.-М.: Колос, 1979.

3. МЭК 34-17. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, питаемые от преобразователей частоты.

4. ГОСТ 24607-88 «Преобразователи частоты полупроводниковые. Общие технические требования». М.: Изд-во стандартов, 1988.

5. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации, Протокол № 12—97 от 21 ноября 1997 г. Издание межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1997.

6. Патент Украины на полезную модель № 46121. Дубовик В., Лебедев Л.М., Перевозник Е.П. Устройство защиты асинхронного электродвигателя. Н02Н07/085. Бюл. № 23. 10.12.2009.

7. Патент України на корисну модель №65113 від 25.11.2011 р. Пристрій захисту асинхронного електродвигуна при несинусоїдальному живленні. Дубовик В.Г., Лебедев Л.М., Гавалешко С.С. МПК Н02Н 7/085. Бюлетень "Промислова власність", №22, 2011 р.