

УДК 621.316.925

СОВРЕМЕННАЯ МИНИМАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



MODERN MINIMAL PROTECTION OF HIGH-VOLTAGE SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

Беседин Евгений Алексеевич

кандидат технических наук, доцент
кафедры электроснабжения промышленных предприятий,
Кубанский государственный технологический университет
omega54@mail.ru

Лакашия Саид Темурович

студент,
Кубанский государственный технологический университет
lakashiya.said@mail.ru

Кутарба Алан Романович

студент,
Кубанский государственный технологический университет
kutarbaalan@gmail.com

Аннотация. В статье сделан анализ основных ненормальных режимов высоковольтных синхронных и асинхронных электродвигателей. Рассмотрены основные виды релейной защиты, применяемые для защиты высоковольтных синхронных электродвигателей. Подробно рассмотрена минимальная защита по напряжению высоковольтного синхронного электродвигателя на современной электронной базе. Отмечены основные преимущества рассмотренного устройства минимальной защиты синхронных электродвигателей.

Ключевые слова: ненормальные режимы электродвигателей, релейная защита высоковольтных синхронных электродвигателей, минимальная защита высоковольтных синхронных электродвигателей.

Besedin Evgeniy Alexeevich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor of
the Department of Power Supply of
Industrial Enterprises,
Kuban State Technological University
omega54@mail.ru

Lakashia Said Temurovich

Student,
Kuban State Technological University
lakashiya.said@mail.ru

Kutarba Alan Romanovich

Student,
Kuban State Technological University
kutarbaalan@gmail.com

Annotation. The article analyzes the main abnormal modes of high-voltage synchronous and asynchronous electric motors. The main types of relay protection used to protect high-voltage synchronous electric motors are considered. The minimum voltage protection of a high-voltage synchronous electric motor on a modern electronic base is considered in detail. The main advantages of the considered device of minimal protection of asynchronous electric motors are noted.

Keywords: abnormal modes of electric motors, relay protection of high-voltage synchronous electric motors, minimal protection of high-voltage synchronous electric motors.

Для синхронных и асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ предусматриваются устройства релейной защиты, действующие при: многофазных коротких замыканиях на выводах и в обмотках статора; перегрузках, вызванных технологическими причинами и затянувшимся пуском или самозапуском; исчезновении или длительном снижении напряжения. В необходимых случаях должна устанавливаться защита от однофазных замыканий на землю. Обычно эти защиты выполняются с помощью вторичных реле прямого действия или реле косвенного действия на оперативном переменном токе. Наряду с ними все чаще находят применение микропроцессорные устройства. Электродвигатели снабжаются также устройствами АПВ и АВР. Рассмотрим возможные релейно-контактные схемы защиты и автоматики [1, 2].

Защита от многофазных коротких замыканий. Для защиты от многофазных коротких замыканий применяются плавкие предохранители, токовые отсечки без выдержки времени и продольные дифференциальные защиты.

Плавкие предохранители могут быть использованы при подключении электродвигателя к сети через выключатель нагрузки. Предохранитель должен удовлетворять условиям:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{пр.ном}} &= U_c \\ I_{\text{пр.откл}} &= I_{\text{к.мах}} \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{вс.ном}} &\geq k_{\text{отс}} I_{\text{раб.мах}} \\ I_{\text{вс.ном}} &\geq I_{\text{пер}} / k_{\text{пер}} \\ I_{\text{вс.ном}} &\geq I_{\text{к.мин}} / (10 \dots 15) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $I_{\text{раб.мах}}$ – максимальный рабочий ток, проходящий через предохранитель;
 $k_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, равный $k_{\text{отс}} = 1,1 \dots 1,25$.

При этом в качестве максимального рабочего тока $I_{\text{раб.мах}}$ берется номинальный ток электродвигателя $I_{\text{д.ном}}$, а ток кратковременной перегрузки $I_{\text{пер}}$ принимается равным пусковому току $I_{\text{пуск}}$ электродвигателя.

Токовая отсечка без выдержки времени устанавливается на электродвигателях мощностью $P_{\text{д}} < 5000$ кВт, причем для электродвигателей мощностью $P_{\text{д}} < 2000$ кВт она выполняется однорелейной, с включением реле на разность токов двух фаз. Если чувствительность отсечки оказывается недостаточной ($k_{\text{ч}} < 2,0$ при металлическом коротком замыкании на выводах обмотки статора) или если привод выключателя имеет два реле тока прямого действия, применяют двухрелейную отсечку, которая является обязательной для электродвигателей мощностью $P_{\text{д}} > 2000$ кВт. Если на электродвигателях мощностью $P_{\text{д}} > 2000$ кВт отсутствует защита от однофазных замыканий на землю, то их отключение при двойных замыканиях на землю возлагается на токовую отсечку. В таком случае она выполняется трехфазной трехрелейной. Возможные схемы токовых отсечек электродвигателей мощностью $P_{\text{д}} < 2000$ кВт показаны на рисунке 1.

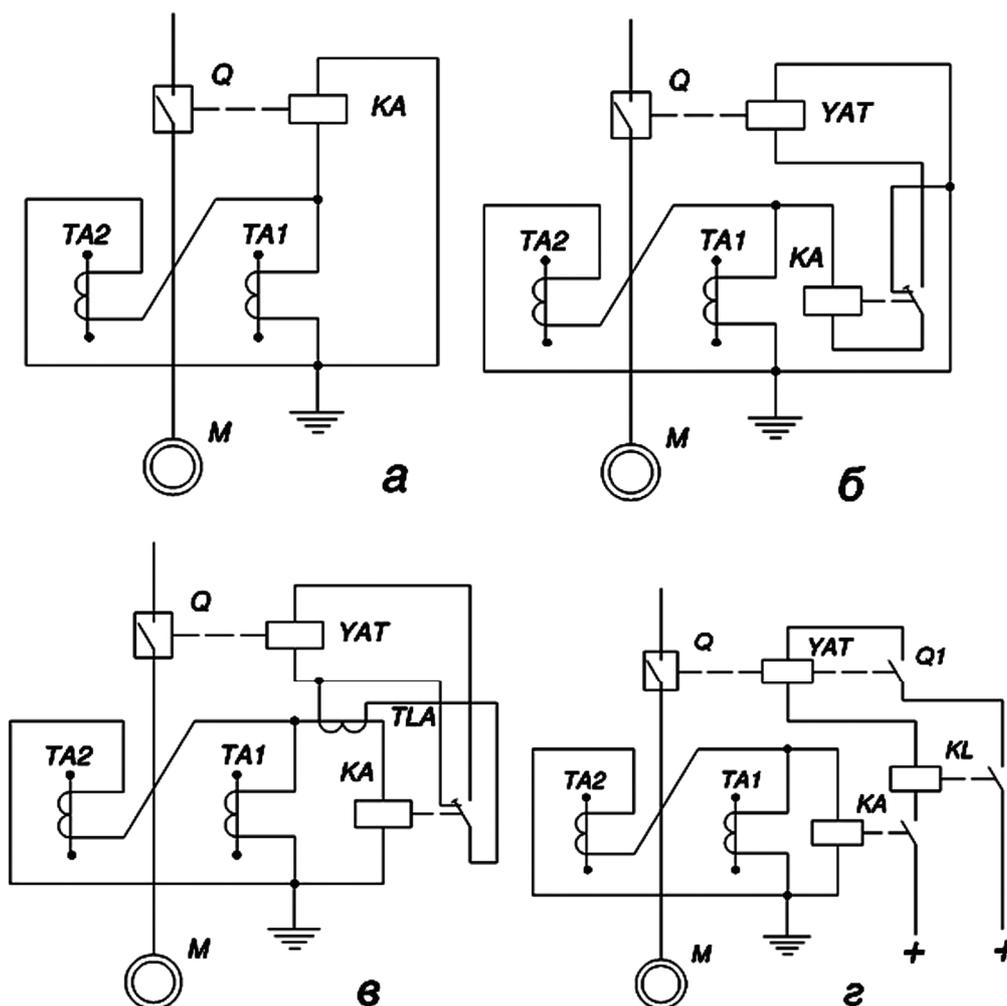


Рисунок 1 – Токовая отсечка на переменном и постоянном оперативном токе

В первых двух схемах (рис. 1, а, б) применяются реле тока КА прямого действия и реле с переключающим контактом, дешунтирующим электромагнит отключения УАТ. Применение насыщающегося трансформатора тока ТЛА в третьей схеме (рис. 1, в) и промежуточного реле КЛ в последней схеме (рис. 1, г) необходимо для уменьшения нагрузки на контакты реле тока. Ток срабатывания реле токовой отсечки выбирается с учетом отстройки от максимального пускового тока $I_{\text{пуск.мах}}$ при выведенных пусковых устройствах по условию:

$$I_{\text{с.р.}}^I = k_{\text{отс}}^I k_{\text{сх}}^{(3)} I_{\text{пуск.мах}} / k_I. \quad (3)$$

При этом коэффициент отстройки берут в пределах $k_{\text{отс}}^I = 2 \dots 2,5$ для реле прямого действия; $k_{\text{отс}}^I = 1,8 \dots 2,0$ для электромагнитного элемента индукционных реле РТ-80; $k_{\text{отс}}^I = 1,4 \dots 1,5$ для электромагнитных реле РТ-40. Чувствительность отсечки считается достаточной, если при двухфазных коротких замыканиях на выводах электродвигателя коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}} < 2,0$. Токовая отсечка может быть выполнена также с использованием реле на интегральных микросхемах в составе ЯРЭ-22015. Однако для отстройки ее от токов в режимах пуска и самозапуска ток срабатывания, определенный по выражению (3), следует увеличить примерно в 1,5 раза.

Продольная дифференциальная защита устанавливается на электродвигателях мощностью $P_{\text{д}} \geq 5000$ кВт и меньше, если токовая отсечка оказывается недостаточно чувствительной. Для упрощения защита выполняется двухфазной. В трехфазном исполнении она рекомендуется только, если двигатели мощностью $P_{\text{д}} \geq 5000$ кВт не имеют быстродействующей защиты от замыкания на землю.

Схемы дифференциальной защиты электродвигателя выполняются аналогично схемам дифференциальной защиты генератора. Ток срабатывания продольной дифференциальной защиты, в том числе и электродвигателя, должен отстраиваться от максимального тока небаланса $I_{\text{нб.рсч.мах}}$. Наибольшего значения ток небаланса достигает при пусках электродвигателя.

В результате исследования обнаружено, что ток небаланса практически не содержит апериодической составляющей и достигает значения номинального тока двигателя. Поэтому $k_{\text{отс}}$ для реле РНТ в ряде случаев приходится выбирать таким же, как и для реле РТ-40. Для повышения чувствительности защиты целесообразно использовать реле с торможением. Реле ДЗТ-11 позволяет принимать минимальный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения $(0,75 \dots 1,4)I_{\text{д.ном}}$. На электродвигателе может быть использована также защита, входящая в комплект устройства ЯРЭ-2201, при этом минимальный ток срабатывания можно снизить до $0,5I_{\text{д.ном}}$.

Защита от замыканий на землю. Она предусматривается на электродвигателях соответствующей мощности, если токи замыкания на землю достигают определенных значений. Реле защиты подключается к однотрансформаторному фильтру тока нулевой последовательности. Если число кабелей, соединяющих распределительное устройство с электродвигателем, больше трех, используются трансформаторы тока нулевой последовательности с подмагничиванием переменным током.

Защиту следует выполнять без выдержки времени, а отстройку от токов переходного процесса обеспечивать выбором коэффициентов отстройки. Ток срабатывания при этом не должен превышать 10 А для электродвигателей мощностью $P_{\text{д}} < 2000$ кВт и 5 А для электродвигателей мощностью $P_{\text{д}} > 2000$ кВт. Если эти требования не обеспечиваются, защиту приходится выполнять с выдержкой времени и вводить в ее схему, как отмечалось выше, дополнительное реле тока с первичным током срабатывания 50...100 А для отключения двойных замыканий на землю без выдержки времени. Для выполнения защиты от замыкания на землю электродвигателей мощностью до 2000 кВт, как правило, применяют реле РТ-40/0,2. На электродвигателях большей мощности защиту рекомендуется выполнять с применением полупроводникового реле тока повышенной чувствительности РТЗ-51 или использовать защиту, входящую в состав комплекта ЯРЭ-22015. Она по существу является аналогом защиты с реле РТЗ-515. Можно применить и токовую направленную защиту ЗЗП-15.

Защита от перегрузки. В соответствии с ПУЭ защита от перегрузки предусматривается на электродвигателях, подверженных перегрузке по технологическим причинам, а также на электродвигателях с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска длительностью 20 с и более. Перегрузка является симметричным режимом, поэтому защита от нее может быть выполнена одним реле, включенным в любую фазу электродвигателя. Выдержка времени защиты отстраивается от длительности пуска электродвигателя в нормальных режимах и самозапуска после действия УАВР и УАПВ, при этом наиболее удобны характеристики тепловых и индукционных реле. На электродвигателях напряжением выше 1 кВ электротепловая защита применяется относительно редко из-за недостатков, присущих электротепловым реле. Наиболее полно отражают тепловую характеристику электродвигателя микропроцессорные устройства релейной защиты. К сожалению, в эксплуатации таких устройств сравнительно мало. Защита от перегрузки обычно осуществляется индукционными элементами реле РТ-80, электромагнитные элементы которых используются для выполнения токовой отсечки. Таким образом, с помощью комбинированных реле РТ-80 осуществляется двухступенчатая токовая защита. Количество реле и схемы их соединения определяются требованиями, предъявляемыми к защите от коротких замыканий – токовой отсечке. Если при этом защита от перегрузки должна действовать на сигнал, то применяются реле РТ-84 с отдельными контактами индукционного и электромагнитного элементов. Действие защиты на отключение допускается на электродвигателях с тяжелыми условиями пуска или самозапуска, а также в тех случаях, когда отсутствует возможность своевременной разгрузки без остановки электродвигателей или если нет постоянного дежурного персонала.

Защита от перегрузки с одним индукционным реле РТ-80 имеет следующие недостатки: ее защитная характеристика не соответствует тепловой характеристике электродвигателя, она не учитывает его перегрузочные возможности, а использование только одного реле затрудняет выявить опасные перегрузки при неполнофазном режиме электродвигателя. Это тем более относится к защите с независимой выдержкой времени.

Нашей промышленностью выпускается также полупроводниковое аналоговое реле с зависимой характеристикой выдержки времени в составе комплектного устройства ЯРЭ-22015. Микропроцессорная элементная база позволила выполнить защиту от перегрузки более полно приспособленную к условиям работы электродвигателя.

Минимальная защита напряжения. В общем случае защита выполняется двухступенчатой. Первая ступень предназначена для облегчения самозапуска ответственных электродвигателей, она отключает электродвигатели неответственных механизмов. Напряжение срабатывания первой ступени устанавливается примерно равным $U_{с.з.}^I = 0,7U_{ном}$, а выдержка времени принимается на ступень селективности больше времени действия быстродействующих защит от многофазных коротких замыканий; $t_{с.з.}^I = 0,5 \dots 1,5$ с. Вторая ступень защиты отключает часть электродвигателей ответственных механизмов, самозапуск которых недопустим по условиям техники безопасности или из-за особенностей технологического процесса. Напряжение срабатывания второй ступени не превышает $U_{с.з.}^{II} = 0,5U_{ном}$, а выдержка времени принимается $t_{с.з.}^{II} = 10 \dots 15$ с. Схемы минимальной защиты напряжения выполняются таким образом, чтобы исключить ее ложное действие при нарушениях во вторичных цепях трансформаторов напряжения.

Одним из перспективных решений защиты высоковольтных электродвигателей является минимальная защита, приведенная в [3]. Указанное устройство относится к релейной защите, а более точно к устройствам, реагирующим на понижение напряжения, и может быть использовано для защиты высоковольтных электродвигателей.

Целью применения данного устройства является повышение надежности минимальной защиты электродвигателя по напряжению путем обеспечения контроля частоты вращения.

На рисунке 2 изображена функциональная схема устройства; на рисунке 3 – диаграмма частоты вращения при выбеге электродвигателя в функции времени.

Устройство содержит датчик напряжения 1 (рис. 1), соединенный входом с питающей сетью электродвигателя, датчик 2 частоты вращения, соединенный с ротором электродвигателя, исполнительный орган 3, блок 4 выдержки времени. Выход датчика напряжения 1 соединен с управляющим входом исполнительного органа 3, а выход датчика 2 частоты – с основным входом исполнительного органа 4.

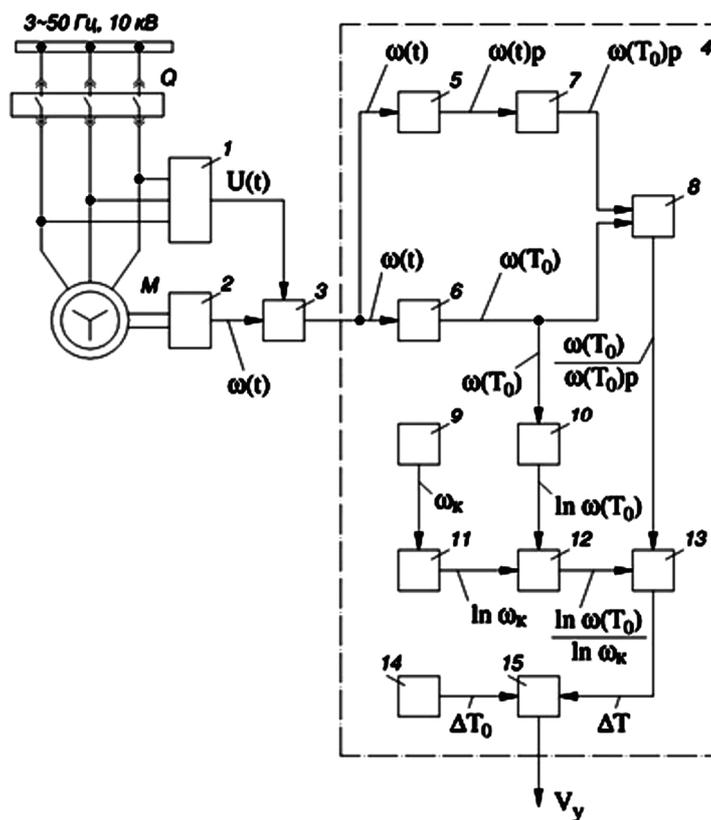


Рисунок 2 – Структурная схема минимальной защиты высоковольтного синхронного электродвигателя

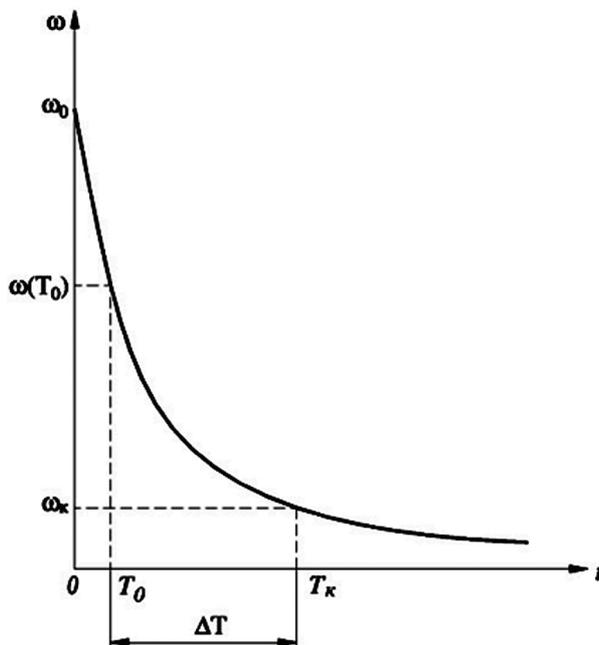


Рисунок 3 – Диаграмма частоты вращения при выбеге электродвигателя в функции времени

Блок 4 выдержки времени включает дифференцирующий блок 5, первый 6 и второй 7 стробирующие блоки, блок 8 деления, блок 9 задания критической частоты вращения, первый 10 и второй 11 логарифмические преобразователи, суммирующий блок 12, блок 13 умножения, блок 14 задания выдержки времени, логический блок 15 сравнения. При этом входы дифференцирующего блока 5 и второго логарифмического преобразователя 7 объединены и образуют вход блока 4 выдержки времени, соеди-

ненного с выходом исполнительного органа 3, выход дифференцирующего блока 5 через первый стробирующий блок 6 связан с первым входом блока 8 деления, а выход второго стробирующего блока 7 – со вторым входом блока 8 деления. Выход последнего связан с первым входом блока 13 умножения, второй вход которого связан с выходом суммирующего блока 12, а выход связан с первым входом логического блока 15 сравнения. При этом входы дифференцирующего блока 5 и второго логарифмического преобразователя 7 объединены и образуют вход блока 4 выдержки времени.

Первый вход суммирующего блока 12 через первый логарифмический преобразователь 10 связан с выходом второго стробирующего блока 7, а второй вход через второй логарифмический преобразователь 11 – с выходом блока 9 задания критической частоты вращения. Вход второго логического блока 15 сравнения связан с выходом блока 14 задания выдержки времени, а выход одновременно является выходом блока 4 выдержки времени и устройства в целом.

Функциональные блоки устройства реализуются на основе существующей элементной базы, Датчик напряжения может быть выполнен при помощи трансформатора напряжения, а датчик частоты вращения – при помощи тахогенератора.

Блоки деления и умножения выполняются на базе аналоговых перемножителей. Логический блок сравнения реализуется на основе компаратора. Блоки стробирования могут быть выполнены как электронные ключи. Дифференцирующий блок содержит усилитель постоянного тока, в цепь обратной связи которого включено активное сопротивление, а на выход включен конденсатор. Основным элементом исполнительного органа является минимальное реле напряжения.

Устройство работает следующим образом. Сигнал $U(t)$ непрерывно снимается с выхода датчика 1 и блокирует исполнительный орган 3. При снижении или исчезновении напряжения исполнительный орган 3 срабатывает и сигнал $\omega(t)$ с выхода датчика 2 частоты вращения через исполнительный орган 3 поступает на вход блока 4 выдержки времени. На выходе блока 4 выдержки времени сигнал разветвляется, в первой ветви он дифференцируется в блоке 5, затем с выхода блока 5 сигнал $\omega(t)p$ (p – дифференциальный оператор) поступает на вход блока 6, где стробируется в начальный момент времени T_0 процесса выбега электродвигателя, в результате на первый вход блока 8 деления поступает сигнал $\omega(T_0)p$. Во второй ветви сигнал $\omega(t)$ стробируется в этот же момент времени в блоке 7, после чего сигнал $\omega(T_0)$ поступает на второй вход блока 8. На выходе блока 8 появляется сигнал $\omega(T_0) / \omega(T_0)p$. Кроме того, сигнал $\omega(T_0)$ с выхода блока 7 поступает на вход первого логарифмического преобразователя 10, с выхода которого сигнала $\ln\omega(T_0)$ поступает на вход суммирующего блока 12.

В блоке 9 задается сигнал критической частоты вращения ω_k , который поступает на второй логарифмический преобразователь 11, с выхода последнего сигнал $\ln\omega_k$ поступает на второй вход суммирующего блока 12, где он вычитается из сигнала $\ln\omega(T_0)$.

Результирующий сигнал $\ln \frac{\omega(T_0)}{\omega_k}$ поступает на вход блока 13 умножения, где он умножается на сигнал $\omega(T_0) / \omega(T_0)p$ с выхода блока 8. Получающийся на выходе блока 13 сигнал ΔT , имеющий физический смысл интервала времени от момента стробирования до достижения электродвигателем критической частоты вращения, поступает на вход логического блока 16 сравнения, где он сравнивается по величине с сигналом ΔT_0 , имеющим физический смысл интервала времени выдержки защиты. Сигнал ΔT_0 поступает от блока 14 задания выдержки времени, при этом величина сигнала T_0 устанавливается в соответствии с уставкой выдержки времени защиты двигателя. Если $\Delta T < \Delta T_0$ на выходе блока 15 появляется сигнал на немедленное отключение электродвигателя V_y , при $\Delta T > \Delta T_0$ сигнал V_y отсутствует, а отключение электродвигателя происходит при поступлении сигнала от защиты двигателя. Таким образом, осуществляется минимальная защита электродвигателя с учетом частоты вращения.

Процесс работы устройства математически описывается следующим образом. Пусть диаграмма частоты вращения имеет вид экспоненциальной кривой (рис. 3), Для такой кривой справедлива зависимость.

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-\alpha t}, \quad (4)$$

где $\omega(t)$ – частота вращения электродвигателя в функции времени; ω_0 – частота вращения электродвигателя перед выбегом; $\alpha = T_M^{-1}$ – коэффициент; T_M – электромеханическая постоянная времени привода; t – время.

Продифференцируя выражение (4) во времени, имеют

$$\omega(t)p = -\alpha\omega_0 e^{-\alpha t}. \quad (5)$$

Деля выражение (5) на выражение (4), получают

$$\frac{\omega(t)p}{\omega(t)} = -\alpha. \quad (6)$$

Прологарифмировав выражение (4) для моментов времени T_0 и T_k , имеют

$$\ln\omega(T_0) = \ln\omega_0 e^{-\alpha T_0}, \quad (7)$$

$$\ln\omega_k = \ln\omega_0 e^{-\alpha T_k}. \quad (8)$$

Вычитая выражение (7) из выражения (8), получаем

$$\begin{aligned} \ln\omega_k - \ln\omega(T_0) &= \ln\frac{\omega_k}{\omega(T_0)} = \ln\omega_0 e^{-\alpha T_k} - \ln\omega_0 e^{-\alpha T_0} = \\ &= \ln\omega_0 + \ln e^{-\alpha T_k} - \ln\omega_0 - \ln e^{-\alpha T_0} = -\alpha T_k + \alpha T_0 = -\alpha(T_k - T_0), \end{aligned}$$

отсюда

$$\ln\frac{\omega_k}{\omega(T_0)} = -\alpha(T_k - T_0) = -\alpha\Delta T \quad (9)$$

или

$$\Delta T = -\frac{1}{\alpha} \ln\frac{\omega_k}{\omega(T_0)}. \quad (10)$$

Подставив выражение (3) а выражение (7), получают

$$\Delta T = \frac{\omega(T_0)}{\omega(T_0)p} \ln\frac{\omega_k}{\omega(T_0)}, \quad (11)$$

где ΔT – интервал времени от момента стробирования в начале выбега T_0 до момента времени T_k , соответствующего критической частоте вращения электродвигателя.

При $\Delta T \leq \Delta T_0$ допустимая выдержка времени меньше заданной, поэтому должно произойти немедленное отключение. При $\Delta T > \Delta T_0$ допустимая выдержка времени больше заданной, поэтому электродвигатель отключается защитой с выдержкой времени.

Преимущество предлагаемого устройства заключается в более надежной защите синхронных электродвигателей. Кроме того, улучшается режим работы технологического оборудования, приводимого электродвигателем.

Литература

1. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
2. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М. : Желдориздат, 2002. – 720 с.
3. А.С. 1728918 СССР Н 02 Н 3/24, 7/08, 7/093. Устройство для минимальной защиты электродвигателя / Б.А. Коробейников, А.И. Ищенко и Е.А. Беседин. – № 4727393/07. – Заявл. 07.08.89. Опул. 23.04.92. Бул. № 15.

References

1. Korogodsky V.I., Kuzhekov S.L., Paperno L.B. Relay protection of electric motors with a voltage higher than 1 kV. – M. : Energoatomiz-DAT, 1987. – 248 p.
2. Figurnov E.P. Relay protection. Textbook for universities W.– Di. transposition. – M. : Jeldorado, 2002. – 720 p.
3. A.S. 1728918 USSR Н 02 Н 3/24, 7/08, 7/093. Device for minimal protection of an electric motor / B. A. Korobeynikov, A. I. Ishchenko and E. A. Besedin. – № 4727393/07. – Declared. 07.08.89. Publ. 23.04.92. Bull. № 15.