Шабанов В.А.
Shabanov V.A.

профессор, канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Путинцева А.А.
Putintseva A.A.

аспирант и старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Резник Е.С.
Reznik E.S.

аспирант и ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Васильев П.И.
Vasilyev P.I.

студент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.316

DOI:

СОГЛАСОВАНИЕ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ЗАЩИТОЙ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТОЙ ВВОДНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

На объектах нефтегазовой отрасли широко применяются высоковольтные асинхронные электродвигатели мощностью до 8 МВт и синхронные электродвигатели мощностью до 12,5 МВт. Такие двигатели используются для привода магистральных насосов на нефтеперекачивающих насосных станциях трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов и для привода компрессорных агрегатов на электроприводных компрессорных станциях. Насосные и компрессорные станции магистральных трубопроводов предъявляют повышенные требования к бесперебойности технологического процесса. Для сохранения устойчиво-

сти и непрерывности технологического процесса релейная защита электродвигателей должна не только обладать достаточной чувствительностью и быстродействием при внутренних повреждениях, но и согласованно действовать с устройствами релейной защиты и автоматики распределительного устройства нефтеперекачивающей станции.

В статье исследуются проблемы согласования зон действия токовой отсечки асинхронного электродвигателя с защитой минимального напряжения и максимальной токовой защитой, устанавливаемой на выключателях ввода распределительных устройств 6 (10) кВ.

На основе анализа условий согласования установлено, что для обеспечения селективности токовой отсечки электродвигателя максимальной токовой защиты ввода и защиты минимального напряжения должны выполняться следующие условия: зона действия максимальной токовой защиты ввода должна быть больше зоны действия токовой отсечки, и зона действия токовой отсечки должна превышать зону действия защиты минимального напряжения, или зона действия максимальной токовой защиты ввода должна быть больше зоны действия защиты минимального напряжения, если второе условие не выполняется.

Получены условия согласования зон действия защит, и предложены мероприятия для выполнения условий согласования зон действия защит.

Ключевые слова: релейная защита, электродвигатель, токовая отсечка, максимальная токовая защита, защита минимального напряжения, зона действия защиты, согласование зон действия, математическое моделирование.

COORDINATION OF ELECTRIC MOTOR CUTOFF WITH UNDER-VOLTAGE PROTECTION AND MAIN CIRCUIT BREAKER'S OVER CURRENT PROTECTION

High-voltage asynchronous motors with power up to 8 MW and synchronous motors with power up to 12,5 MW find wide application on objects of oil and gas industry. Such motors are used for the main line pump drive of oil pumping stations of pipeline transport of oil and oil products and for drive of compressor units at electrically driven compressor stations. Pumping and compressor stations of the main pipelines impose increased requirements to continuity of technological process. For retention of stability and the continuity of technological process electric motor relay protection has to not only have sufficient sensitivity and fast release at internal faults, but also to work in coordination with devices of relay protection and automatic equipment of the distributing gear of the oil pumping station.

Problems of coordination of operating zone of a asynchronous electric motor cutoff with under-voltage protection and main circuit breaker's overcurrent protection of distributing gears of 6 (10) kV are investigated in article.

On the basis of the analysis of coordination conditions it is established that for ensuring selectivity of a electric motor current cutoff, main circuit breaker's overcurrent protection and under-voltage protection the following conditions have to be satisfied: the operating zone of main circuit breaker's overcurrent protection has to be more operating zone of a current cutoff, and the operating zone of a current cutoff has to exceed an operating zone of under-voltage protection or the operating zone of main circuit breaker's overcurrent protection has to be more operating zone of under-voltage protection if the second condition is not satisfied.

Coordination conditions of protection's operating zone have been received and actions for performance of coordination conditions of protection's operating zone have been offered.

Key words: relay protection, electric motor, cutoff, overcurrent protection, under-voltage protection, protection's operating zone, coordination of operating zones, mathematic simulation.

Введение

На объектах бурения, добычи и транспорта нефти и газа широко применяются высоковольтные асинхронные и синхронные электродвигатели (ЭД) [1, 2]. Мощность, потребляемая высоковольтными двигателями на предприятиях нефтегазовой отрасли, составляет до 95 % от всей потребляемой предприятием мощности. На нефтеперекачивающих насосных станциях трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов высоковольтные двигатели используются для привода магистральных и подпорных насосов. Для сохранения непрерывности технологического процесса перекачки релейная защита ЭД должна не только обладать достаточной чувствительностью и быстродействием при внутренних повреждениях, но и согласованно действовать с устройствами релейной защиты и автоматики распределительного устройства [3-5]. В статье исследуются проблемы согласования токовой отсечки (ТО) ЭД с защитой минимального напряжения (ЗМН) и максимальной токовой защитой (МТЗ), устанавливаемой на выключателях ввода распределительных устройств 6 (10) кВ.

Актуальность согласования ТО с другими защитами

Для защиты ЭД при внутренних межфазных коротких замыканиях (КЗ) используются дифференциальные защиты и ТО, действующие на отключение ЭД без выдержки времени. При этом для ЭД мощностью до 2 МВт ТО является основной защитой, а для ЭД мощностью от 2 до 5 МВт используется в качестве основной защиты, если она обладает достаточной чувствительностью. К недостаткам ТО относится большой ток срабатывания, обусловленный необходимостью отстройки от пускового тока ЭД [6, 7]. Из-за большого тока срабатывания, который может быть соизмерим с токами КЗ, отсечка защищает только часть обмотки статора.

При КЗ в обмотке статора может срабатывать не только ТО, но и МТЗ, устанавливаемая на вводном выключателе ЗРУ-6 (10) кВ (далее «МТЗ ввода»). Основным назначением МТЗ ввода является защита шин 6 (10) кВ. Кроме того, МТЗ ввода выполняет функции дальнего резервирования защит ЭД и отходящих линий и используется для блокирования

ЗМН при КЗ в сети предприятия, когда ток КЗ по вводу протекает от питающей сети к шинам. Чувствительность МТЗ ввода проверяется по току КЗ на шинах, а ток срабатывания отстраивается от тока самозапуска.

Для эффективного выполнения функции блокирования зона действия МТЗ ввода должна быть больше зоны действия ЗМН при КЗ на любом из отходящих присоединений, в том числе и в двигателе. Однако в ряде режимов это требование не выполняется, и ЗМН может ложно срабатывать [8, 9]. При этом после отключения вводного выключателя от ЗМН происходит пуск схемы автоматического включения резерва (АВР) с последующим включением секционного выключателя на неустранённое КЗ. Особенно опасно включение АВР на неустранённое КЗ внутри двигателя, т.к. такое включение может привести к развитию аварии и выходу двигателя из строя на длительный срок. Таким образом, согласование зоны действия ТО электродвигателя с МТЗ ввода и ЗМН при КЗ в обмотке статора ЭД является актуальной задачей.

Метод исследования

Для исследования устройств релейной защиты и автоматики широко используется математическое моделирование [10-12]. Структурная схема математической модели электрической сети и исследуемых защит приведена на рисунке 1.

Математическая модель содержит блок моделей электрической сети, блок моделей релейной защиты и блок определения зон действия защит. Рассмотрим работу математической модели и анализ согласования ТО, МТЗ ввода и ЗМН на примере схемы электрооборудования нефтеперекачивающей станции при двухсекционном распределительном устройстве (рис. 2).

Рисунок 1. Структурная схема математической модели

Рисунок 2. Схема распределительного устройства 6 (10) кВ

В блоке моделей электрической сети определяются пусковой ток ЭД $I_{\text{пуск.}}$, напряжение на шинах 6 (10) кВ при самозапуске $U_{\text{сзп}}$, ток ввода в режиме самозапуска $I_{\text{сзп}}$, ток включения, протекающий по обмотке статора в начальный момент самозапуска, ток $I_{\text{кз}}$ при КЗ в обмотке статора (в точке К1), напряжение на шинах при КЗ в обмотке статора $U_{\text{ш.}}$. При распределительном устройстве по рисунку 2 в модели электрической сети используются следующие выражения:

$$I_{\text{пуск.}} = \frac{U_{\text{с.}}}{X_{\text{с.}} + X_{\text{п.ЭД}}}, \quad (1)$$

$$U_{\text{сзп}} = U_{\text{с.}} \cdot \frac{X_{\text{э.}}}{X_{\text{с.}} + X_{\text{э.}}}, \quad (2)$$

$$I_{\text{сзп}} = \frac{U_{\text{с.}}}{X_{\text{с.}} + X_{\text{э.}}}, \quad (3)$$

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{с.}}}{X_{\text{с.}} + X_{\text{э.кз}}}, \quad (4)$$

$$U_{\text{ш.}} = \frac{U_{\text{с.}} \cdot X_{\text{э.кз}}}{X_{\text{с.}} + X_{\text{э.кз}}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{с.}}$ – напряжение питающей сети; $X_{\text{с.}}$ – эквивалентное реактивное сопротивление питающей сети; $X_{\text{п.ЭД}}$ – пусковое сопротивление электродвигателя; $X_{\text{э.}}$ – эквивалентное сопротивление электродвигателей, подключенных к сети после восстановления питания; $X_{\text{э.кз}}$ – эквивалентное сопротивление обмотки статора электродвигателя от линейных выводов до точки внутреннего КЗ.

Сопротивление $X_{\text{э.кз}}$ определяется с учетом взаимоиנדукции обмотки статора до точки повреждения с короткозамкнутой частью обмотки статора и с обмоткой ротора. Методика расчета тока трехфазного КЗ в обмотке статора рассмотрена в [6, 13, 14]. В соответствии с [13], для приведенного ЭД без учета активных сопротивлений обмоток статора и ротора справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{с.}} = j(X_1 + X_{\text{с.}})I_1 + jX_M(I_1 + I_2 + I_3) \\ 0 = jX_2I_2 + jX_M \cdot (I_1 + I_2 + I_3) \\ 0 = jX_3I_3 + jX_M \cdot (I_1 + I_2 + I_3) \end{cases}, \quad (6)$$

где X_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора до точки КЗ с числом витков W_1 ; X_2 и

X_3 – индуктивные сопротивления рассеяния обмотки ротора с числом витков W_2 и обмотки статора после точки КЗ с числом витков W_3 соответственно; X_M – сопротивления взаимоиנדукции между обмотками и главные индуктивные сопротивления обмоток W_1 , W_2 и W_3 .

Решением системы уравнений (6) относительно индуктивного сопротивления обмотки статора до точки КЗ является ток КЗ по выражению (4), в котором эквивалентное сопротивление до точки КЗ равно

$$X_{\text{э.кз}} = X_1 + \frac{X_2X_3X_M}{X_2X_3 + X_2X_M + X_3X_M}. \quad (7)$$

В блоке моделей релейных защит определяются токи срабатывания ТО, МТЗ ввода и напряжение срабатывания ЗМН.

Ток срабатывания отсечки $I_{\text{ТО}}$ принимается по выражению:

$$I_{\text{ТО}} = K_{\text{отс.ТО}} \cdot I_{\text{пуск.}}, \quad (8)$$

где $K_{\text{отс.ТО}}$ – коэффициент отстройки; $I_{\text{пуск.}}$ – пусковой ток по (1).

Коэффициент отстройки учитывает бросок пускового тока и бросок тока включения при самозапуске [15]. Расчетным режимом для определения тока срабатывания ТО является максимальный режим питающей сети, при котором сопротивление сети $X_{\text{с.}}$ в (1) будет наименьшим ($X_{\text{с.мин}}$).

Напряжение срабатывания первой ступени ЗМН $U_{\text{ЗМН}}$ отстраивается от напряжения на шинах при самозапуске при срабатывании АВР секционного выключателя по выражению

$$U_{\text{ЗМН}} = \frac{U_{\text{сзп}}}{K_{\text{отс.У}}}, \quad (9)$$

где $U_{\text{сзп}}$ – напряжение самозапуска по (2); $K_{\text{отс.У}}$ – коэффициент отстройки ЗМН, принимаемый равным 1,1 – 1,2.

Расчетными режимами для определения напряжения срабатывания ЗМН являются минимальный режим питающей сети, при котором сопротивление сети $X_{\text{с.}}$ в (2) будет наибольшим ($X_{\text{с.макс}}$), и максимальный режим потребителя, при котором в самозапуске участвует наибольшее число электродвигателей. При этом эквивалентное сопротивление электродвигателей $X_{\text{э.}}$ будет наименьшим ($X_{\text{э.мин}}$).

Ток срабатывания МТЗ ввода ИМТЗ принимается из условия возврата реле тока при

самозапуске после включения секционного выключателя при АВР по выражению:

$$I_{\text{МТЗ}} = K_{\text{отс.МТЗ}} \cdot I_{\text{СЗП}}. \quad (10)$$

Расчетным режимом для определения тока срабатывания МТЗ является максимальный режим питающей сети и потребителя, при котором сопротивления X_c и X_{Σ} в (3) будут наименьшими ($X_{c,\min}$ и $X_{\Sigma,\min}$).

В блоке определения зон действия защит определяются зоны действия ТО, МТЗ ввода и ЗМН. На границе зон действия ТО, МТЗ ввода и ЗМН выполняются, соответственно, равенства:

$$I_{\text{ТО}} = I_{\text{КЗ}}, \quad U_{\text{ш.}} = U_{\text{ЗМН}}, \quad I_{\text{МТЗ}} = I_{\text{КЗ}}. \quad (11)$$

Длину зоны действия защит будем определять по величине эквивалентного сопротивления обмотки статора двигателя $X_{\Sigma\text{КЗ}}$ до точки КЗ. Для определения зоны действия ТО подставим в (11) значения токов $I_{\text{ТО}}$ и $I_{\text{КЗ}}$ из выражений (8) и (4). С учетом (1) получим:

$$\frac{K_{\text{отс.ТО}}}{X_{c,\min} + X_{\text{п.ЭД}}} = \frac{1}{X_c + X_{\Sigma\text{КЗ}}}.$$

Решим полученное уравнение относительно сопротивления $X_{\Sigma\text{КЗ}}$ до места КЗ. Обозначив его $X_{\text{ТО}}$, получим для зоны действия ТО:

$$X_{\text{ТО}} = \frac{X_{c,\min} + X_{\text{п.ЭД}}}{K_{\text{отс.ТО}}} - X_c. \quad (12)$$

Аналогично для зон действия МТЗ ввода $X_{\text{МТЗ}}$ и ЗМН $X_{\text{ЗМН}}$ при подстановке (4), (5), (9) и (10) в (11) можно получить:

$$X_{\text{МТЗ}} = \frac{X_{c,\min} + X_{\Sigma,\min}}{K_{\text{отс.МТЗ}}} - X_c, \quad (13)$$

$$X_{\text{ЗМН}} = \frac{X_{\Sigma,\min} \cdot X_c}{K_{\text{отс.У}} \cdot (X_{c,\max} + X_{\Sigma,\min}) - X_{\Sigma,\min}}. \quad (14)$$

Анализ условий согласования. Выражения (12) – (14) определяют длину зон действия ТО, МТЗ и ЗМН. Токовая отсечка двигателя Д1 (рис. 2) при КЗ в обмотке статора действует на отключение выключателя Q7. В случае КЗ в обмотке статора за пределами зоны действия ТО, но в пределах зоны действия ЗМН возможно отключение выключателя

Q1 ввода 1 от ЗМН. При этом происходит пуск АВР, включение секционного выключателя Q6 и подача напряжения питания на ЭД при внутреннем КЗ, что является недопустимым. Для исключения пуска АВР в случае КЗ в обмотке статора за пределами зоны действия ТО зоны действия ТО, МТЗ ввода и ЗМН должны быть согласованы. Защита минимального напряжения работает только при трехфазных КЗ. Поэтому условия согласования защит необходимо рассматривать при трехфазных КЗ.

Условие 1: при КЗ в обмотке статора зона действия МТЗ ввода по (13) должна превышать зону действия отсечки по (12). Из (12) и (13) следует, что зона действия МТЗ может быть больше, чем зона действия ТО, если

$$\frac{X_{c,\min} + X_{\Sigma,\min}}{K_{\text{отс.МТЗ}}} \geq \frac{X_{c,\min} + X_{\text{п.ЭД}}}{K_{\text{отс.ТО}}}. \quad (15)$$

При выполнении этого условия МТЗ ввода будет резервировать ТО в пределах всей зоны действия отсечки. Если в самозапуске принимает участие один двигатель, то условие (15) принимает вид:

$$K_{\text{отс.ТО}} \geq K_{\text{отс.МТЗ}}. \quad (16)$$

Это неравенство, и, следовательно, условие 1 всегда выполняются.

Если в самозапуске участвует несколько двигателей, тогда $X_{\Sigma,\min} = X_{\text{п.ЭД}}/n$, где n – число двигателей, и условие 1 может не выполняться.

Условие 2: зона действия отсечки по (12) должна превышать зону действия ЗМН по (14). Если это условие не выполняется, то при КЗ в ЭД за пределами зоны действия отсечки может срабатывать ЗМН с действием на отключение вводного выключателя, пуском АВР и включением секционного выключателя. Из (12) и (14) следует, что зона действия ТО больше зоны действия ЗМН, если

$$\frac{X_{c,\min} + X_{\text{п.ЭД}}}{K_{\text{отс.ТО}}} - X_c \geq \frac{X_{\Sigma,\min} \cdot X_c}{K_{\text{отс.У}} \cdot (X_{c,\max} + X_{\Sigma,\min}) - X_{\Sigma,\min}}. \quad (17)$$

Условие 3: если условие 2 не выполняется, то для того, чтобы при КЗ за пределами зоны действия отсечки не произошло ложного срабатывания ЗМН, зона действия МТЗ ввода по

(13) должна перекрывать зону действия ЗМН по (14). Для этого должно выполняться следующее условие согласования ЗМН и МТЗ ввода:

$$\frac{X_{c,\min} + X_{\varepsilon,\min}}{K_{отс.МТЗ}} - X_c \geq \frac{X_{\varepsilon,\min} \cdot X_c}{K_{отс.У} \cdot (X_{c,\max} + X_{\varepsilon,\min}) - X_{\varepsilon,\min}} \quad (18)$$

Таким образом, для обеспечения селективности ТО, МТЗ ввода и ЗМН должно выполняться условие 1 и одно из условий, 2 или 3. Проверку условий согласования и их графическую интерпретацию рассмотрим на примере.

Пример. К каждой секции шин 6 кВ подключены по одному электродвигателю типа

АТД-5000 номинальной мощностью 5 МВт. В относительных единицах (о.е.) номинальное сопротивление двигателя 0,577 о.е.; пусковое сопротивление $X_{п.ЭД} = 0,178$ о.е.; сопротивление питающей сети: изменяется от 0,068 о.е. (в минимальном режиме) до 0,045 о.е. (в максимальном режиме). В самозапуске участвует двигатель одной секции шин при рабочем режиме двигателя на другой секции шин.

Результаты расчета зон действия защит по (12) – (14) представлены графически на рисунке 3.

Рисунок 3. Графики зависимости зон действия ТО, ЗМН и МТЗ от эквивалентного сопротивления питающей сети

Графики изменения защищаемых зон построены в зависимости от сопротивления системы X_c при изменении его от наименьшего до наибольшего.

Графики зон МТЗ и ТО не пересекаются, причем график МТЗ идет выше графика ТО. Это значит, что зона действия МТЗ при любом сопротивлении питающей сети больше зоны действия отсечки, и условие 1 выполняется.

Графики токовой отсечки и ЗМН также не пересекаются, причем график ТО идет ниже

графика ЗМН. Это значит, что зона действия ЗМН при любом сопротивлении питающей сети больше зоны действия отсечки, и условие 2 не выполняется.

Графики МТЗ и ЗМН пересекаются в точке А. При сопротивлении питающей сети больше, чем $X_{c,A}$, длина зоны МТЗ меньше, чем длина зоны ЗМН, и условие 3 не выполняется. Это значит, что если при $X_c > X_{c,A}$ эквивалентное сопротивление до точки КЗ в обмотке статора находится в интервале от $X_{c,K31}$ до $X_{c,K32}$, максимальная токовая

защита может отказать, а ЗМН может ложно сработать. Это приведет к неселективному отключению выключателя ввода и может привести к потере устойчивой работы нефтеперекачивающей станции.

Поэтому при сопротивлениях системы больше, чем $X_{с.а}$, требуется дополнительные мероприятия для согласования защит. Для согласования необходимо либо повышать чувствительность ТО, либо повышать чувствительность МТЗ ввода так, чтобы либо зона действия отсечки, либо зона действия МТЗ перекрывали бы зону действия ЗМН. Если это сделать невозможно, то для защиты ЭД необходимо вместо отсечки установить дифференциальную защиту.

Список литературы

1. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтяной и газовой промышленности: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 2000. – 487 с.
2. Применение электродвигателей в нефтяной промышленности / Л.М. Першина, С.И. Бак, Ю.С. Першин, С.П. Читипаховян. – М.: Недра, 1989. – 167 с.
3. Шабанов, В.А., Алексеев, В.Ю. Согласование выдержек времени релейной защиты НПС // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов: научно-техн. журн. – 2007. – Вып. 4 (70). – С. 84-89.
4. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Обеспечение селективности второй ступени защиты минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Промышленная энергетика: журн. – 2008. – № 4. – С. 25-27.
5. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Выбор уставок защит минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Энергетик. – 2008. – № 7. – С. 37-39.
6. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 49-57.
7. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок. – М.: Недра, 1978. – 349 с.
8. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Токмаков Д.А., Шепелин А.В. Недостатки блокировки защиты минимального напряжения на нефте-

Вывод

При КЗ в обмотке статора ЭД зоны действия ТО, МТЗ ввода и ЗМН должны быть согласованы. Если зона действия ЗМН не превышает зону действия отсечки, то согласование отсечки электродвигателя, МТЗ ввода и ЗМН не требуется. Если зона действия ЗМН превышает зону действия ТО, то требуется согласование зон действия ЗМН и МТЗ ввода. Получены условия согласования зон действия защит, и предложены мероприятия для выполнения условий согласования.

перекачивающих станциях // Нефтегазовое дело: электрон. научн. журн. – 2015. – № 6. – С. 234-252.

9. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Юсупов Р.З. Пути повышения эффективности блокировки защиты минимального напряжения от токовой защиты ввода // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – № 3. – Т. 12. – С. 18-25.

10. Sykes J., Madani V., Burger J., Adamiak M., Premierlani W. Reliability of Protection Systems (What are the Real Concerns) // 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineer. 29 March-1 April 2010. – College Station. – P. 1-16.

11. Румянцев Ю.В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 203-224.

12. Проблема верификации средств моделирования электроэнергетических систем и концепция ее решения / А.А. Суворов, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, М.В. Андреев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 1. – С. 11-23.

13. Путинцева А.А., Шабанов В.А. Уравнения для токов при внутренних трехфазных коротких замыканиях в асинхронных электродвигателях // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических

систем и комплексов: IV-й межвуз. сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 148-161.

14. Шабанов В.А., Путинцева А.А. Определение токов в электродвигателе при внутренних трехфазных коротких замыканиях // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: IV-й межвуз. сб. науч. тр. – Уфа, Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 205-216.

15. Гондуров С.А., Михалев С.В., Пирогов М.Г., Соловьев А.Л. Релейная защита электродвигателей напряжением 6-10 кВ терминалами БМРЗ: методика. – СПб.: ПЭИПК, 2013. – С. 5, 12.

References

1. Men'shov B.G., Ershov M.S., Jarizov A.D. Elektrotehnicheskiye ustanovki i komplekсы v neftjanoj i gazovoj promyshlennosti: Ucheb. dlya vuzov. – M.: Nedra, 2000. – 487 p.

2. Primenenije elektrodvigatелеj v neftjanoj promyshlennosti / L.M. Pershina, S.I. Bak, Ju.S. Pershin, S.P. Chitipahovjan. – M.: Nedra, 1989. – 167 p.

3. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju. Soglasovanie vyderzhek vremeni relejnoj zashhity NPS // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov: nauchno-tehn. zhurn. – 2007. – Vyp. 4 (70). – P. 84-89.

4. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju. Obespechenije selektivnosti vtoroj stupeni zashhity minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijah // Promyshlennaja energetika: zhurn. – 2008. – № 4. – P. 25-27.

5. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju. Vybór ustavok zashhit minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijah // Energetik. – 2008. – № 7. – P. 37-39.

6. Korogodskij V.I. Relejnaja zashhita elektrodvigatелеj naprjazhenijem vyshe 1 kV / V.I. Korogodskij, S.L. Kuzhekov, L.B. Paperno. – M.: Energoatomizdat, 1987. – P. 49-57.

7. Gimojan G.G. Relejnaja zashhita gornyh elektroustanovok. – M.: Nedra, 1978. – 349 p.

8. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Tokmakov D.A., Shepelin A.V. Nedostatki blokirovki zashhity minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijah // Neftegazovoje delo: elektron. nauchn. zhurn. – 2015. – № 6. – P. 234-252.

9. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Jusupov R.Z. Puti povyshenija effektivnosti blokirovki zashhity minimal'nogo naprjazhenija ot tokovoj zashhity vvoda // Elektrotehnicheskiye i informacionnyje komplekсы i sistemy. – 2016. – № 3. – Vol. 12. – P. 18-25.

10. Sykes J., Madani V., Burger J., Adamiak M., Premerlani W. Reliability of Protection Systems (What are the Real Concerns) // 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineer. 29 March-1 April 2010. – College Station. – P. 1-16.

11. Rumjancev Ju.V. Kompleksnaja model' dlja issledovanija funkcionirovanija cifrovoj differencial'noj zashhity silovogo transformatora // Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i energ. ob'edinenij SNG. – 2016. – Vol. 59. – № 3. – P. 203-224.

12. Problema verifikacii sredstv modelirovanija elektroenergeticheskikh sistem i koncepcija ejo reshenija / A.A. Suvorov, A.S. Gusjev, A.O. Sulajmanov, M.V. Andrejev // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2017. – № 1. – P. 11-23.

13. Putinceva A.A., Shabanov V.A. Uravnenija dlja tokov pri vnutrennih trehfaznyh korotkih замыканиjah v asinhronnyh elektrodvigateljah // Povyszenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskikh sistem i komplekсов: IV-j mezhvuz. sb. nauch. tr. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2016. – P. 148-161.

14. Shabanov V.A., Putinceva A.A. Opredelenije tokov v elektrodvigatеле pri vnutrennih trehfaznyh korotkih замыканиyah // Povyshenije nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskikh sistem i komplekсов: IV-j mezhvuz. sb. nauch. tr. – Ufa, Izd-vo UGNTU, 2016. – P. 205-216.

15. Gondurov S.A., Mihalev S.V., Pirogov M.G., Solovjov A.L. Relejnaja zashhita elektrodvigatелеj naprjazhenijem 6-10 kV terminalami БМРЗ: методика. – СПб.: ПЭИПК, 2013. – P. 5, 12.