

УДК 621.31

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ ЗАЩИТЫ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Лосев Федор Алексеевич¹,
fedor_los@mail.ru

Сушков Валерий Валентинович²,
sushkovvv@gray-nv.ru

Тимошкин Вадим Владимирович³,
timoshkinvv@tpu.ru

Мартыанов Антон Сергеевич⁴,
martyanovas@gtng.ru

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

² Нижневартровский государственный университет,
Россия, 628600, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 56.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

⁴ ПАО «Гипротюменнефтегаз»,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Республики, 62.

Актуальность. Значительная доля механизированной добычи нефти осуществляется с помощью установок электрических центробежных насосов. В их состав входит погружной асинхронный электродвигатель, который обладает низкой устойчивостью к кратковременным нарушениям электроснабжения из-за особенностей конструкции. Для уменьшения влияния таких нарушений применяют защиту минимального напряжения. Её характеристики срабатывания имеют строго заданную форму и не учитывают текущий режим работы погружного электродвигателя, также при изменении режима работы происходит смещение границы динамической устойчивости электродвигателя и появляется область между этой границей и характеристикой срабатывания защиты, что приводит к необоснованным отключениям установок электрических центробежных насосов. Для уменьшения числа таких отключений необходимо разработать защиту минимального напряжения погружного асинхронного электродвигателя с адаптивной характеристикой срабатывания.

Цель исследования: повысить устойчивость погружного асинхронного электродвигателя за счет разработки защиты минимального напряжения с адаптивной характеристикой срабатывания.

Объекты: защита минимального напряжения, погружной асинхронный электродвигатель.

Методы: математическое моделирование на основе уравнений Парка–Горева для погружного асинхронного электродвигателя; имитационное моделирование защиты минимального напряжения с адаптивной характеристикой срабатывания, включающей искусственную нейронную сеть, в программном пакете Matlab Simulink.

Результаты. Разработана имитационная модель защиты минимального напряжения погружного асинхронного электродвигателя с адаптивной характеристикой срабатывания на основе искусственной нейронной сети. Произведено моделирование защиты минимального напряжения с адаптивной характеристикой срабатывания для погружного асинхронного электродвигателя. Установлено, что приближение характеристики срабатывания защиты минимального напряжения к границе динамической устойчивости позволит увеличить коэффициент запаса устойчивости по напряжению до 12 %.

Ключевые слова:

Защита минимального напряжения, характеристика срабатывания, динамическая устойчивость, погружной асинхронный электродвигатель, искусственная нейронная сеть.

Введение

В настоящее время для поддержания максимальной добычи нефтяные скважины переводят на механизированный способ эксплуатации, что предполагает применение установок электрических центробежных насосов (УЭЦН). Объем добываемой с помощью таких установок нефти, в ряде случаев, составляет 65,4 % [1]. Погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД), входящий в УЭЦН, имеет ряд конструктивных особенностей,

что обуславливает его низкую устойчивость к кратковременным нарушениям электроснабжения (КНЭ) из-за малого значения электромеханической постоянной времени и к быстрому протеканию переходных процессов [2]. При этом нагрузка и частота вращения вала электродвигателя могут изменяться в процессе эксплуатации по требованиям технологического процесса добычи нефти, также вышеуказанные параметры оказывают существенное влияние на время выбега ПЭД [2, 3].

Кроме того, при частотном управлении ПЭД с увеличением частоты питающего напряжения растет запас кинетической энергии УЭЦН, что положительно сказывается в момент возникновения провала напряжения (допустимая длительности провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости повышается). Увеличение нагрузки ПЭД приводит к большему расходу накопленной кинетической энергии, следовательно, и к меньшей допустимой длительности провала напряжения. Известно, что уровни допустимого динамического снижения напряжения могут находиться в пределах от 0,5 до 0,9 номинального напряжения [4]. Установлено [2, 3], что даже провал напряжения длительностью 0,15 секунды способен привести к нарушению устойчивой работы УЭЦН. Статистика показывает, что доля КНЭ от общего количества аварий в системе электроснабжения нефтяного месторождения может достигать 48 %, при этом недоотпуск нефти по причине КНЭ составляет 65 % от общего количества, что составляет десятки тыс. тонн недобытой нефти в год [5].

Сейчас для снижения влияния КНЭ применяют защиту минимального напряжения (ЗМН) [6]. Она контролирует величину питающего напряжения и отключает защищаемый электродвигатель при снижении напряжения до критического значения, при этом ЗМН должна селективно и с высокой надежностью срабатывать при возникновении провалов питающего напряжения [6]. Наиболее распространены следующие виды характеристик срабатывания (ХС) ЗМН: одноступенчатая [6], трехступенчатая [7], зависимая [8] (рис. 1).

Одноступенчатая ЗМН, как правило, имеет выдержку времени, не превышающую 10 с, и уставку по напряжению не выше 70 % номинального на-

пряжения [6]. Она предназначена для отключения электродвигателя при длительном исчезновении напряжения по условиям технологического процесса. Из-за малого значения электрохимической постоянной времени ПЭД такую защиту необходимо отстраивать по результатам расчета динамической устойчивости.

Для более полного использования запаса динамической устойчивости электродвигателей по напряжению была предложена трехступенчатая защита [7]. Её настройка производится по результатам расчета устойчивости электродвигателей. Уставка третьей ступени принимается равной 95...98 % от напряжения статической устойчивости, а выдержка времени первой ступени отстраивается от времени динамической устойчивости при провале напряжения до нуля. Остальные уставки выбираются по выражениям [7]:

$$u_{3МНi} = u_{cy} - \sqrt[n]{u_{cy}^{n-i-1} (u_{cy} - u_{3МН(i+1)})^i},$$

$$t_{3МНi} = \tau_0 \frac{1 - u_{3МНi}}{1 - \frac{u_{3МНi}}{u_{cy}}},$$

где $u_{3МНi}$ – уставка срабатывания i -й ступени защиты; $t_{3МНi}$ – выдержка времени i -й ступени защиты; u_{cy} – напряжение статической устойчивости электродвигателя; τ_0 – время динамической устойчивости электродвигателя при провале напряжения до нуля; n – число ступеней защиты.

Современные терминалы микропроцессорных релейных защит электродвигателей позволяют использовать ЗМН с зависимой характеристикой срабатывания [8]. Такая характеристика повышает степень использования запаса устойчивости электродвигателя, но не позволяет использовать

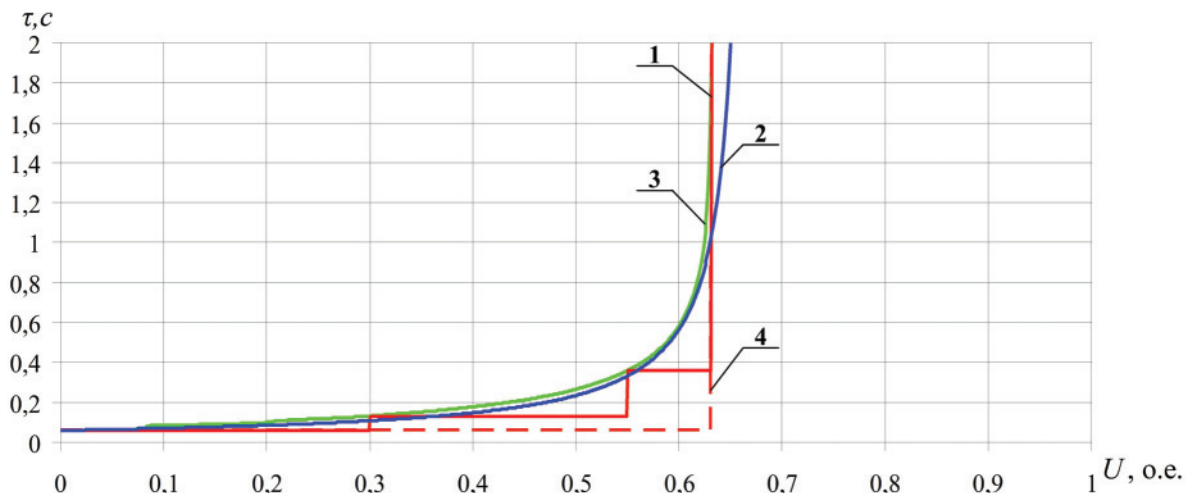


Рис. 1. Зависимости допустимой длительности провала напряжения (τ) от остаточного напряжения на шинах (U) для ПЭД-90 117М: 1 – граница срабатывания трехступенчатой защиты минимального напряжения, 2 – граница срабатывания защиты минимального напряжения с зависимой выдержкой времени, 3 – граница динамической устойчивости, 4 – граница срабатывания одноступенчатой защиты минимального напряжения

Fig. 1. Admissible voltage sag duration (τ) dependences on sag magnitude (U) for SEM-90 117M: 1 is the three-stage undervoltage protection actuating curve, 2 is the actuating curve of undervoltage protection with dependent time endurance, 3 is the dynamic stability curve, 4 is the one-stage undervoltage protection actuating curve

его полностью. Эта ХС представляет собой зависимость выдержки времени t от значения остаточного напряжения U на шинах двигателя [8]:

$$t(U) = \frac{T}{1 - \frac{U}{U_s}},$$

где U_s – уставка срабатывания защиты по напряжению; T – коэффициент кратности времени.

Типовые защиты имеют следующие недостатки:

1. Обладают жестко заданной характеристикой, которая не позволяет учитывать параметры текущего режима работы ПЭД: загрузку и частоту вращения вала электродвигателя.
2. ЗМН с жесткой характеристикой срабатывания имеют зону нечувствительности между ХС и границей динамической устойчивости (ГДУ) (рис. 1), что приводит к необоснованным отключениям ПЭД и, следовательно, к экономическим потерям (упущенной прибыли).

Таким образом, применяемые в нефтепромысловых электрических сетях ЗМН не могут обеспечить требуемого запаса устойчивости по напряжению. Поэтому естественным образом возникает задача разработки ЗМН с адаптивной характеристикой срабатывания, которая позволит приблизить характеристику срабатывания ЗМН к границе динамической устойчивости с учетом режима работы узла нагрузки с ПЭД.

Методы исследования

Устойчивость узла нагрузки характеризуется границей динамической устойчивости и коэффициентом запаса устойчивости по напряжению [7, 9].

Границу динамической устойчивости ПЭД можно определить с помощью известных математических моделей асинхронного электродвигателя, кабеля и трансформатора [10, 11]. В качестве модели ПЭД используем уравнения Парка–Горева, модель питающего кабеля – линия с распределенными параметрами, для моделирования трансформатора используется Т-образная схема замещения. Эти модели включают систему дифференциальных уравнений, которая решается в итерационном процессе методом Рунге–Кутты 4-го порядка [3, 12]. На вход трансформатора подается одноступенчатый провал питающего напряжения заданной длительности и глубины, далее рассчитывается выбег

погружного асинхронного электродвигателя. После окончания провала питающее напряжение восстанавливается до номинального значения и рассчитывается самозапуск ПЭД. Если самозапуск успешен, то увеличивается длительность провала напряжения и расчет повторяется, если самозапуск не успешен, то получаем точку на границе динамической устойчивости и увеличиваем глубину провала напряжения, цикл повторяется.

Коэффициент запаса устойчивости по напряжению рассчитывается по формуле [13]:

$$k = \frac{S_{уст}}{S_{общ}},$$

где $S_{уст}$ – площадь области устойчивой работы, ограниченная ГДУ и единицей по оси напряжения; $S_{общ}$ – площадь области, ограниченная единицей по оси напряжения и временем ввода резерва $t_{пр}$ по оси длительности провала напряжения.

Для оценки устойчивости ПЭД используется типовая схема питания (рис. 2). Все исследования выполняются для погружного асинхронного электродвигателя мощностью 90 кВт – ПЭД-90 117М, подключенного с помощью кабеля КЛБП сечением 25 мм² длиной 1200 м и трансформатора ТМПН мощностью 160 кВА.

Оценим влияние вида характеристики срабатывания ЗМН на коэффициент запаса устойчивости по напряжению для ПЭД-90 117М. При использовании ЗМН с ХС, максимально приближенной к ГДУ (кривая 3, рис. 1), коэффициент запаса устойчивости по напряжению максимальный k_m . Если ХС одноступенчатая (кривая 4, рис. 1), то коэффициент запаса составляет 0,88 k_m , трехступенчатая (кривая 1, рис. 1) – 0,94 k_m , зависящая (кривая 2, рис. 1) – 0,97 k_m . Таким образом, приближение ХС к ГДУ позволит повысить запас устойчивости по напряжению на 3...12 %.

Также коэффициенты запаса устойчивости по напряжению узла нагрузки в различных режимах работы значительно отличаются друг от друга, в связи с изменением ГДУ [2, 3] (рис. 3).

Например, при номинальной нагрузке коэффициент запаса устойчивости по напряжению равен 0,4, при нагрузке 90 % от номинальной – 0,44, при нагрузке 70 % – 0,52. Следовательно, уменьшение загрузки приводит к увеличению области устойчивой работы электродвигателя, что ведет к расширению области необоснованных срабатываний ЗМН.

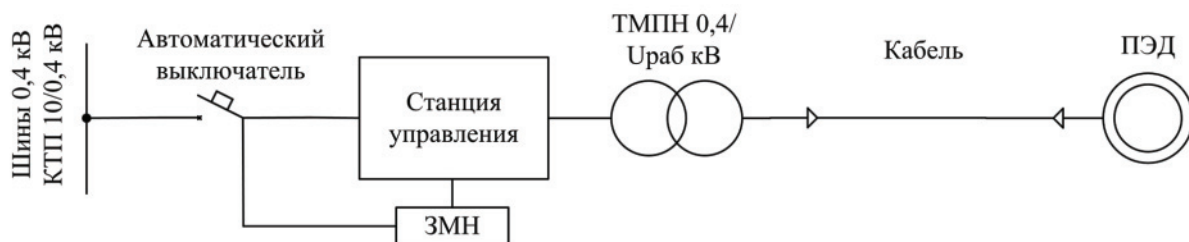


Рис. 2. Однолинейная схема электропитания ПЭД с адаптивной ЗМН

Fig. 2. Power supply diagram of SEM with the adaptive undervoltage protection

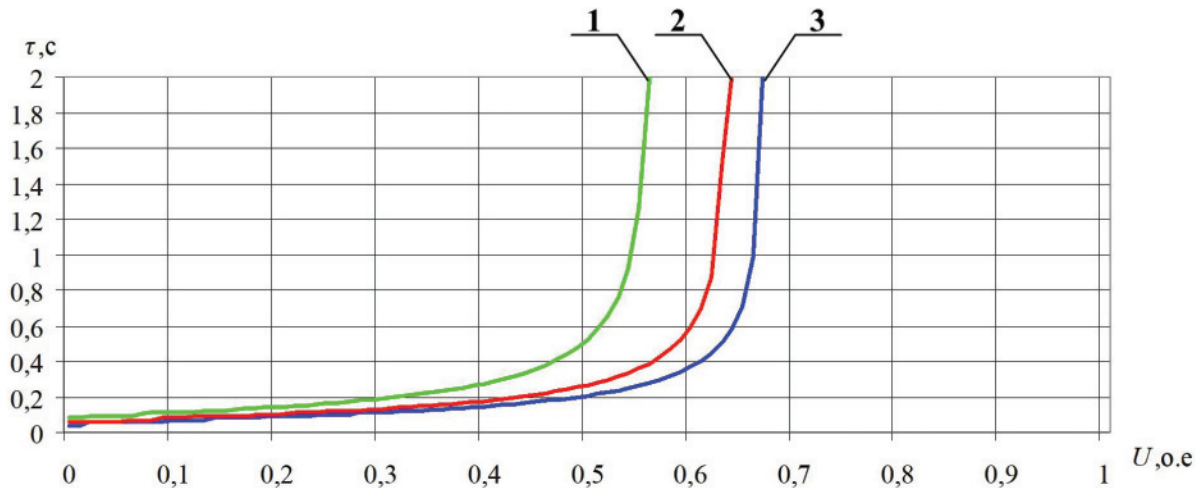


Рис. 3. Границы динамической устойчивости ПЭД-90 117М при загрузке: 1) 70 %; 2) 90 %; 3) 100 %

Fig. 3. Dynamic stability curves SEM-90 117M at loading of: 1) 70 %; 2) 90 %; 3) 100 %

Для устранения недостатков типовых ЗМН необходимо разработать защиту, которая позволяет изменять ХС в режиме реального времени с учетом текущих параметров работы ПЭД. Этим требованиям отвечают методы искусственного интеллекта, наиболее перспективным из которых является искусственная нейронная сеть (ИНС) [14]. Ее основные достоинства: возможность учитывать большое количество входных параметров; скорость вычислений за счет параллельной обработки информации; отказоустойчивость – при выходе из строя нескольких нейронов, качество работы ИНС снижается незначительно [15, 16]. Недостаток – необходимость предварительного обучения.

На входы ИНС будет подаваться мгновенное значение напряжения, коэффициент загрузки и текущая частота вращения вала электродвигателя. На выходе получаем допустимую длительность провала напряжения по условию динамической устойчивости для рассматриваемого режима работы ПЭД, которую используем в качестве уставки ЗМН.

При использовании ИНС для решения задач аппроксимации возникает ряд трудностей: выбор оптимальной обучаемой выборки; выбор и настройка метода обучения; подбор структуры ИНС. В источниках литературы [17–19] есть общие расчетные формулы, которые позволяют получить начальные данные для выбора структуры ИНС и ее обучения, а также правильно сформировать обучающую выборку, но в большинстве случаев они требуют определенной коррекции.

Выбор структуры ИНС был основан на предыдущих успешных результатах, где ИНС использовалась в качестве идентификатора состояния и наблюдателя угловой скорости [20, 21]. В данных работах ИНС показала работоспособность и малую погрешность. Количество нейронов в скрытом слое было рассчитано, а затем скорректировано экспертным путем: вначале было сформировано не-

сколько ИНС с разным количеством нейронов в скрытом слое и далее с помощью тестовой выборки была выбрана ИНС с меньшей погрешностью.

Для построения ГДУ при различных значениях загрузки и частоты вращения вала электродвигателя была выбрана ИНС с тремя нейронами во входном слое, 40 – в скрытом слое, 1 – в выходном слое. С помощью средств Neural Network Toolbox в Matlab Simulink была получена модель этой ИНС (рис. 4).

Нейроны входного слоя передают входные сигналы на скрытый слой, не преобразуя их. В качестве функции активации скрытого слоя в данном случае можно было выбрать: сигмоидальную униполярную или сигмоидальную биполярную (гиперболический тангенс). В итоге был выбран гиперболический тангенс, так как он обладает рядом преимуществ: более быстрая вычислимость; выходной диапазон лежит в пределах -1 от $+1$; позволяет ускорить обучение ИНС.

Для обучения нейронной сети использовался один из встроенных методов в Neural Network Toolbox Matlab, основанный на алгоритме Левенберга–Марквардта (Levenberg–Marquardt Algorithm) [22–26]. Выбранный метод имеет оптимальную скорость сходимости и позволяет с необходимой точностью решать поставленные задачи. К его недостаткам можно отнести необходимость вычисления на каждом шаге итерации обратной матрицы, что значительно усложняет вычисления при больших размерах модели. Встроенный пакет Parallel Computing Toolbox в Matlab позволяет ускорить обучение сложных нейронных сетей, имеющих большое количество данных в тренировочном шаблоне, за счет использования параллельных вычислений.

Процесс обучения искусственной нейронной сети проводили следующим образом: все коэффициенты связей между нейронами инициализировали случайными числами, затем сети предъявляли обучающую выборку и, с помощью алгоритма обуче-

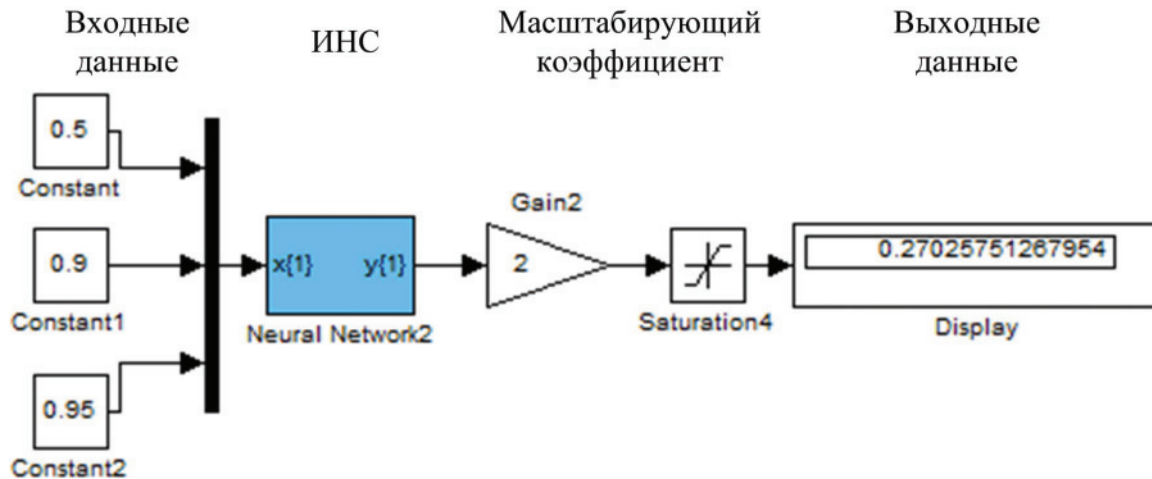


Рис. 4. Модель ИНС в Matlab Simulink

Fig. 4. Model of an artificial neural network in Matlab Simulink

ния, коэффициенты синapseтических связей подстраивали при выполнении циклической процедуры так, чтобы расхождение между обучающей выборкой и реакцией сети на соответствующие входные данные было минимальным.

В качестве тренировочных данных для ИНС использовались границы динамической устойчивости ПЭД-90 117М, полученные для различных значений загрузки и частоты вращения вала электродвигателя. Входные данные для обучения представлены в таблице, шаг по напряжению составляет 1 %.

Таблица. Входные параметры для обучения ИНС

Table. Input parameters for training artificial neural network

| Питающее напряжение Power voltage, % | Коэффициент загрузки Loading factor | Частота вращения вала Shaft speed, o.e./r.u. |
|---|--|---|
| 0–100 | 1 | 0,95 |
| | 0,8 | 0,95 |
| | 1 | 0,76 |
| | 0,8 | 0,3 |
| | 0,5 | 0,5 |

После обучения ИНС позволяет определять допустимую длительность провала питающего напряжения по условию динамической устойчивости ПЭД, используя выявленные при обучении зависимости между входными и выходными данными, согласно выражению:

$$y_i(t) = f_3 \left(a_{30i} + \sum_{i=1}^N a_{3i} f_2 \times \left(a_{20m} + \sum_{k=1}^M a_{2m} f_1 \left(\sum_{k=1}^K a_{1k} x_k(t) + a_{10k} \right) \right) \right),$$

где $x_k(t)$ – вектор входных параметров; K – число нейронов первого слоя; M – число нейронов второго слоя; N – число нейронов третьего слоя; a_{10k} , a_{20m} , a_{30i} – начальные возбуждения нейронов первого,

второго и третьего слоя соответственно; a_{1k} , a_{2m} , a_{3i} – весовые коэффициенты нейронов для первого, второго и третьего слоя; f_1 , f_2 , f_3 – функции активации первого, второго и третьего слоя; $y_i(t)$ – значение выходного параметра.

Результаты экспериментов

Моделирование проводилось для погружного асинхронного электродвигателя ПЭД-90 117М, подключенного с помощью кабеля КППП сечением 25 мм² длиной 1200 м и трансформатора ТМПН мощностью 160 кВА (рис. 2).

В Matlab Simulink была создана имитационная модель фидера ПЭД-90 117М с адаптивной защитой минимального напряжения на основе ИНС (рис. 5). Система защиты включает обученную искусственную нейронную сеть, таймер и элемент сравнения. На входы ИНС подаются значения напряжения, тока и частоты вращения вала ПЭД, по которым она определяет допустимую длительность провала питающего напряжения по условию динамической устойчивости электродвигателя. На вход таймера подается напряжение, если его значение меньше напряжения статической устойчивости ПЭД, то начинается отсчет. Сигналы с таймера и ИНС подаются на элемент сравнения, если текущая длительность провала питающего напряжения превышает допустимое значение, полученное с помощью искусственной нейронной сети, то подается сигнал на отключение фидера ПЭД, если значение питающего напряжения восстановится до номинального уровня за время, меньшее допустимой длительности провала, то защита возвращается в исходное состояние.

После обучения была проведена проверка работоспособности адаптивной ЗМН. На ПЭД-90 117М, работающий при коэффициенте загрузки, равном 0,9, и частоте вращения вала 0,9 о.е., подавались одноступенчатые провалы напряжения различной глубины, результаты моделирования – на рис. 6.

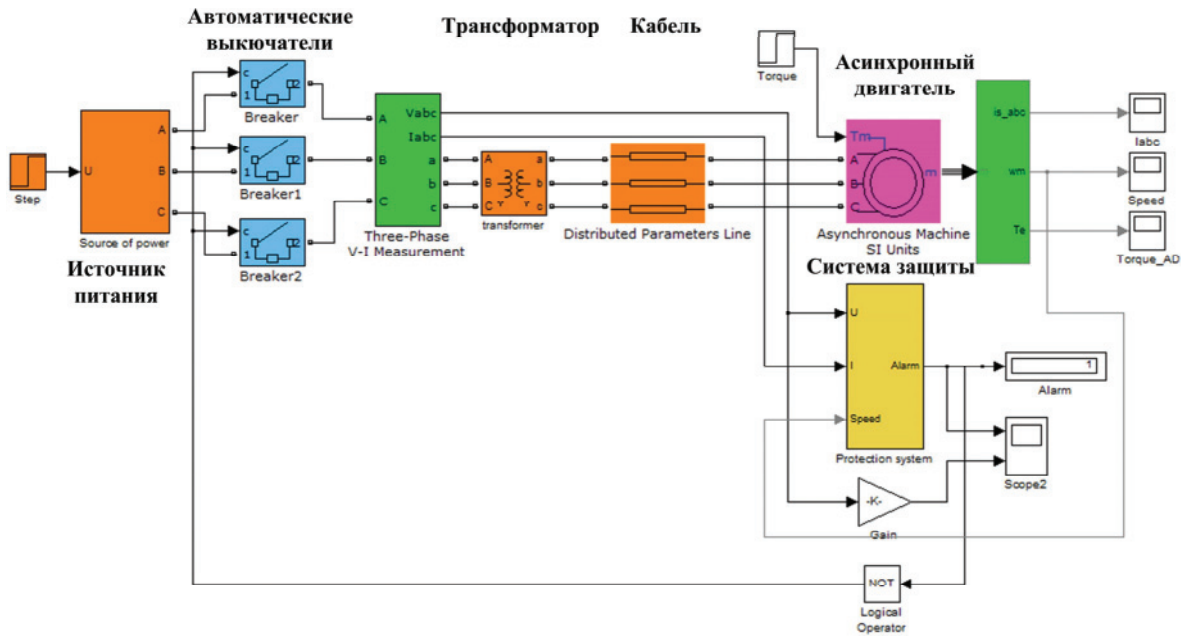


Рис. 5. Имитационная модель фидера ПЭД-90 117М с адаптивной защитой минимального напряжения

Fig. 5. Simulation model of SEM-90 117M feeder with the adaptive undervoltage protection

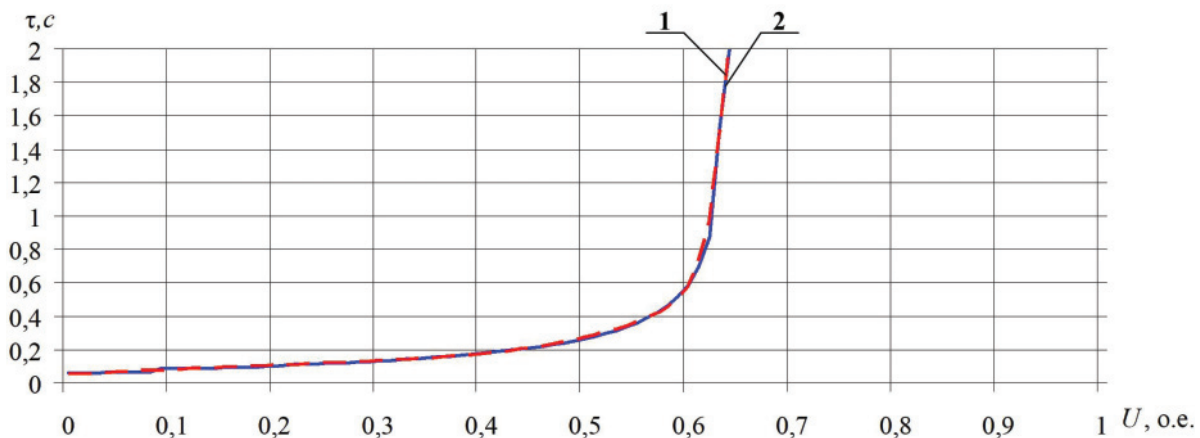


Рис. 6. Зависимости допустимой длительности провала напряжения (τ) от остаточного напряжения на шинах (U) для ПЭД-90 117М: 1 – граница срабатывания предлагаемой защиты минимального напряжения, 2 – граница динамической устойчивости

Fig. 6. Admissible voltage sag duration (τ) dependences on sag magnitude (U) for SEM-90 117M: 1 is the dynamic stability curve, 2 is the advanced minimum voltage protection actuating curve

Из полученных результатов следует, что средняя относительная ошибка составляет 2,7 %, максимальная абсолютная ошибка не превышает 0,01 с. Для исключения зоны нечувствительности ЗМН допустимую длительность провала напряжения по условию динамической устойчивости ПЭД необходимо уменьшить на время срабатывания коммутирующего устройства, например автоматического выключателя.

После обучения и проверки ИНС формируется программный код, моделирующий структуру ИНС, вводятся значения весов, полученные при обучении. Далее этот код можно использовать, на-

пример, в промышленных контроллерах, для реализации адаптивной ЗМН.

Таким образом, адаптивная защита минимального напряжения на основе ИНС позволяет приблизить характеристику срабатывания к ГДУ при различных режимах работы УЭЦН, неограниченным набором обучающих данных, и максимально использовать запас устойчивости ПЭД по напряжению.

Выводы

1. Для устранения недостатков типовых защит минимального напряжения погружных асинхронных электродвигателей разработана защита с адаптив-

ной характеристикой срабатывания, которая позволяет изменять её в режиме реального времени с учетом текущих параметров работы погружного электродвигателя, что увеличит коэффициент запаса устойчивости по напряжению до 12 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уразаков К.Р. Основные направления развития техники и технологии механизированной добычи нефти // Нефтяное хозяйство. – 2007. – № 8. – С. 126–127.
2. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Поляков В.Е. Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 9. – С. 104–106.
3. Лосев Ф.А., Мартянов А.С., Сушков В.В. Оценка динамической устойчивости погружных установок электроцентробежных насосов // Актуальные вопросы энергетики: материалы Международной научно-практической конференции. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. – С. 303–306.
4. СТП 57.00.047–81. Уровни допустимого динамического снижения питающего напряжения погружных центробежных электронасосов. – Тюмень: Ротапринт Гипротюменнефтегаза, 1981. – 15 с.
5. Мартянов А.С., Сушков В.В., Небилович И.С. Кратковременные нарушения электроснабжения в электрических сетях нефтяных месторождений // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: Материалы V Международной научно-практической конференции. – Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2016. – С. 123–126.
6. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями. – М.: Норматика, 2018. – 462 с.
7. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. – М.: ООО «Издательский дом «Недра», 2010. – 319 с.
8. Каталог Sepam серий 20, 40 с расширенными функциями, 60 и 80. Цифровые реле защиты. – М.: Schneider electric, 2012. – 288 с.
9. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Некоторые итоги исследования устойчивости промышленных электротехнических систем // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2009. – № 3. – С. 57–68.
10. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
11. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
12. Лосев Ф.А., Мартянов А.С. Оценка влияния сечения питающего кабеля на устойчивость погружного электродвигателя // Новые технологии – нефтегазовому региону: Материалы Международной научно-практической конференции. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 229–232.
13. Егоров А.В., Новоселова Ю.В. Устойчивость асинхронных многомашинных комплексов при внешних многопараметрических возмущениях // Промышленная энергетика. – 2000. – № 11. – С. 24–27.
14. Ершов М.С., Рупчев И.О. Адаптация защит узлов электрических нагрузок к потере питания при несимметричных возмущениях // Промышленная энергетика. – 2004. – № 1. – С. 47–50.
2. Для разработки адаптивных защит минимального напряжения необходимо применять методы искусственного интеллекта, наиболее перспективным из которых является искусственная нейронная сеть.
15. Hagan M., Demuth H. Neural Network Design. 2nd ed. URL: <http://hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf> (дата обращения: 01.10.2017).
16. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – Cambridge, MA: MIT Press, 2016. – 779 p.
17. Recursive neural network as speed controller for two-sided electrical drive with complex mechanical structure / K. Nowopolski, B. Wicher, D. Łuczak, P. Siwek // 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. – Miedzydroje, Poland, 2017. – P. 576–581.
18. Modeling baseline electrical energy use of chiller system by artificial neural network / W.N. Adnan, N.Y. Dahlan, I. Musirin // IEEE International Conference on Power and Energy. – Melaka, Malaysia, 2016. – P. 500–505.
19. Application of Paraconsistent Artificial Neural Network in Statistical Process Control acting on voltage level monitoring in Electrical Power Systems / C.M. da Cruz, A. Rocco, M.C. Mario, D.V. Garcia, G. Lambert-Torres, J.M. Abe, C.R. Torres, J.I. da Silva Filho // 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems. – Porto, Portugal, 2015. – P. 1–6.
20. Оптимальное управление многомашинным комплексом системы поддержания пластового давления на нефтяных месторождениях / В.В. Сушков, М.К. Велиев, В.В. Тимошкин, Т.Д. Гладких // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 82–84.
21. Нейросетевая идентификация и диагностика электрических машин в условиях сильных импульсных помех / В.В. Тимошкин, Р.Ю. Ткачук, А.С. Глазырин, В.И. Полищук, Т.А. Глазырина, Л.Е. Козлова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 282–285.
22. Demuth H., Beale M. MATLAB/Neural Network Toolbox User's Guide. Version 4. – Massachusetts: MathWorks, 1999. – 846 p.
23. Cirstea M.N., Dinu A. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems. – Oxford: Newness, 2002. – 400 p.
24. A Novel Neural-Network-Based Adaptive Control Scheme for Output-Constrained Stochastic Switched Nonlinear Systems / B. Niu, D. Wang, H. Li, X. Xie, N.D. Alotaibi, F.E. Alsaadi // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2017. – V. 99. – P. 1–15.
25. Classification of Electrical Disturbances in Real Time Using Neural Networks / I. Monedero, C. León, J. Ropero, A. Garcia, J.M. Elena, J.C. Montaño // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – V. 22. – № 3. – P. 1288–1296.
26. Neural network electrical machine faults diagnosis based on multi-population GA / Z. Chen, Y. Zhao, Y. Zheng, R. Lou // IEEE International Joint Conference on Neural Networks. – Hong Kong, China, 2008. — P. 3795–3799.

Поступила 16.04.2018 г.

Информация об авторах

Лосев Ф.А., ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия.

Сушков В.В., доктор технических наук, профессор кафедры энергетики Нижневартовского государственного университета.

Тимошкин В.В., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мартянов А.С., начальник сектора проектирования схем электроснабжения ПАО «Гипротюменнефтегаз».

UDC 621.31

INCREASING STABILITY OF ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMPS IN SUBMERSIBLE ELECTROMOTOR TO VOLTAGE SAGS WITH ADAPTIVE UNDERVOLTAGE PROTECTION

Fedor A. Losev¹,
fedor_los@mail.ru

Valery V. Sushkov²,
sushkovvv@gray-nv.ru

Vadim V. Timoshkin³,
timoshkinvv@tpu.ru

Anton S. Martyanov⁴,
martyanovas@gtng.ru

¹ Industrial University of Tyumen,
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

² Nizhnevartovsk State University,
56, Lenin Street, Nizhnevartovsk, 628600, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁴ Giprotymenneftegaz,
62, Respubliki Street, Tyumen, 625000, Russia.

Relevance. The considerable part of the mechanized oil production is carried out with electric centrifugal pumps. The submersible induction electromotor is the main part of the pumps. It has low resistance to short interruptions of power supply. The setting of the undervoltage protection is applied to decrease influence of the interruptions. The actuating characteristics have the given form and do not consider operating conditions of the submersible electromotor. The change in operating conditions of the submersible electromotor results in a shift of dynamic stability curve and the area between this curve and the actuating characteristic of the undervoltage protection occurs that leads to unreasonable shutdowns of electric centrifugal pumps. It is necessary to develop the adaptive undervoltage protection of the submersible induction electromotor for decreasing a number of such shutdowns.

The main aim of the research is to increase submersible induction electromotor stability by development of the adaptive undervoltage protection

Objects of the research are undervoltage protection and submersible induction electromotor.

Methods: mathematical simulation on the basis of Park–Gorev equations for submersible induction electromotor; imitating modeling of the adaptive undervoltage protection including artificial neural network in a software package Matlab Simulink.

Results. The authors have developed a simulation model of the submersible electromotor adaptive undervoltage protection on the basis of an artificial neural network; the undervoltage protection with the adaptive actuating characteristic for the submersible induction electromotor was simulated. The approximation of the actuating characteristic of undervoltage protection to dynamic stability curve will allow increasing a stability reserve on voltage to 12 %.

Key words:

Undervoltage protection, actuating characteristic, dynamic stability, submersible induction electromotor, artificial neural network.

REFERENCES

1. Urazakov K.R. The basic lines of development of technics and technology of an oil lifting. *Oil industry*, 2007, no. 8, pp. 126–127. In Rus.
2. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Polyakov V.E. Dynamic stability of operating modes electrocentrifugal pumps installations. *Oil industry*, 2010, no. 9, pp. 104–106. In Rus.
3. Losev F.A., Martyanov A.S., Sushkov V.V. Otsenka dinamicheskoy ustoychivosti pogrzhnykh ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov [Assessment of dynamic stability of dipping electrocentrifugal pumps installations]. *Aktualnye voprosy energetiki. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Topical issues of power. Proc. of the International scientific conference]. Omsk, OmGTU Publ., 2017. pp. 303–306.
4. STP 57.00.047–81. Urovni dopustimogo dinamicheskogo snizheniya pitayushchego napryazheniya pogrzhnykh tsentrobezhnykh elektronasosov [Enterprise Standard 57.00.047–81. Admissible dynamic power voltage lowering levels of submersible centrifugal electric pumps]. Tyumen, Rotaprint Giprotymenneftegaz Publ., 1981. 15 p.
5. Martyanov A.S., Sushkov V.V., Nebilovich I.S. Kratkovremennye narusheniya elektroobrazovaniya v elektricheskikh setyakh nefteanykh mestorozhdeniy [Short-term power supply interruptions in oil field power systems]. *Kultura, nauka, obrazovanie: problemy i perspektivy. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Culture, science, education: problems and perspectives. Proc. of the International scientific conference]. Nizhnevartovsk, NVGU Publ., 2016. pp. 123–126.
6. *Pravila ustroystva elektroustanovok. Vse deystvuyushchie razdely shestogo i sedmogo izdaniy s izmeneniyami i dopolnleniyami* [Regulations for electrical installation. All operating sections of the sixth and seventh issues with changes and additions]. Moscow, Normatika Publ., 2018. 462 p.

7. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. *Ustoychivost' promyshlennyykh elektrotekhnicheskikh sistem* [Stability of the industrial electrotechnical systems]. Moscow, Nedra Publ., 2010. 319 p.
8. *Katalog Sepam seriy 20, 40 s rasshirennymi funktsiyami, 60 i 80. Tsifrovye rele zashchity* [Sepam series 20, series 40, series 60, series 80 catalogue]. Moscow, Schneider electric Publ., 2012. 288 p.
9. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. Some results of research of stability of industrial power supply systems. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2009, no. 3, pp. 57–68. In Rus.
10. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient electromechanical phenomena in electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.
11. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [Issues of electrical systems stability]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 456 p.
12. Losev F.A., Martyanov A.S. Otsenka vliyaniya secheniya pitayushchego kabelya na ustoychivost' pogruzhnogo elektrodvigatelya [Assessment of feeding cable section impact on dipping electro-motor stability]. *Novye tekhnologii – neftegazovomu regionu. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [New technologies – to the oil and gas region. Proc. of the International scientific conference]. Tyumen, TIU Publ., 2017. pp. 229–232.
13. Egorov A.V., Novoselova Yu.V. Ustoychivost' asinkhronnykh mnogomashinnykh kompleksov pri vneshnikh mnogoparametricheskikh vozmushcheniyakh [Asynchronous multiple machine complexes stability in case of external multiparameter interruptions]. *Industrial power engineering*, 2000, no. 11, pp. 24–27.
14. Ershov M.S., Rupchev I.O. Adaptatsiya zashchit uzlov elektricheskikh nagruzok k potere pitaniya pri nesimmetrichnykh vozmushcheniyakh [Adaptation of electric loadings nodes protection to voltage loss at asymmetrical interruptions]. *Industrial power engineering*, 2004, no. 1, pp. 47–50.
15. Hagan M., Demuth H. *Neural Network Design*. 2nd ed. Available at: <http://hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf> (accessed 1 October 2017).
16. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MA, MIT Press, 2016. 779 p.
17. Nowopolski K., Wicher B., Łuczak D., Siwek P. Recursive neural network as speed controller for two-sided electrical drive with complex mechanical structure. *22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*. Międzyzdroje, Poland, 2017. pp. 576–581.
18. Adnan W.N., Dahlan N.Y., Musirin I. Modeling baseline electrical energy use of chiller system by artificial neural network. *IEEE International Conference on Power and Energy*, Melaka, Malaysia, 2016. pp. 500–505.
19. Da Cruz C.M., Rocco A., Mario M.C., Garcia D.V., Lambert-Torres G., Abe J.M., Torres C.R., Da Silva Filho J.I. Application of Paraconsistent Artificial Neural Network in Statistical Process Control acting on voltage level monitoring in Electrical Power Systems. *18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems*. Porto, Portugal, 2015. pp. 1–6.
20. Sushkov V.V., Veliev M.K., Timoshkin V.V., Gladkih T.D. Optimum control for multiple computer complex of oil field formation pressure maintenance system. *Oil industry*, 2017, no. 2, pp. 82–84. In Rus.
21. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polishchok V.I., Glazyrina T.A., Timoshkin V.V., Kozlova L.E. Neural network identification and diagnosis of electrical machines in a strong impulse noise. *Scientific transport problems of Siberia and the Far East*, 2011, no. 2, pp. 282–285. In Rus.
22. Demuth H., Beale M. *MATLAB/Neural Network Toolbox User's Guide*. Version 4. Massachusetts, MathWorks, 1999. 846 p.
23. Cirstea M.N., Dinu A. *Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems*. Oxford, Newness, 2002. 400 p.
24. Niu B., Wang D., Li H., Xie X., Alotaibi N.D., Alsaadi F.E. A Novel Neural-Network-Based Adaptive Control Scheme for Output-Constrained Stochastic Switched Nonlinear Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, vol. 99, pp. 1–15.
25. Monedero I., León C., Ropero J., García A., Elena J.M., Montañó J.C. Classification of Electrical Disturbances in Real Time Using Neural Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 3, pp. 1288–1296.
26. Chen Z., Zhao Y., Zheng Y., Lou R. Neural network electrical machine faults diagnosis based on multi-population GA. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. Hong Kong, China, 2008. pp. 3795–3799.

Received: 16 April 2018.

Information about the authors

Fedor A. Losev, assistant, Industrial University of Tyumen.

Valery V. Sushkov, Dr. Sc., professor, Nizhnevartovsk State University.

Vadim V. Timoshkin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anton S. Martyanov, chief of the power supply schemes design sector, Giprotymenneftegaz.