ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(11):96-108
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.316.925.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_96

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГОРНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПО СУБГАРМОНИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Т.Е. Минакова[1], В.И. Маларев[1], А.А. Коржев[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Minakova_TE@pers.spmi.ru

Аннотация: Предложен метод защиты электрических двигателей, используемых в горнодобывающей промышленности, основанный на идентификации режимов успешных пусков и самозапусков по наличию субгармонических параметров переходных процессов в фазных токах, и их отсутствию в аварийный режимах (коротких замыканий). Данный принцип функционирования позволяет априори разделить режимы работы двигателя на аварийные с ускорением действия при отсутствии субгармонических параметров, и, наоборот, рабочие с повышенными токами пуска (самозапуск), но с запретом срабатывания релейной защиты при возникновении субгармонических процессов. Результатом идентификации субгармонических параметров переходных процессов является кардинальное изменение способа отстройки средств защиты от рабочих режимов пуска и самозапуска, не требующего повышенных уставок срабатывания по току. Предложен алгоритм и математическая формализация способа выделения субгармонических составляющих токов. Выполнено моделирование режимов пуска и короткого замыкания в среде MATLAB Simulink, показавшее, что для корректной работы предложенного способа необходимо и достаточно сравнить амплитуды фазных токов за 5–6 периодов. Следовательно, данный способ обеспечивает отключение электродвигателей в аварийных режимах за 100–120 мс. В результате, метод позволяет увеличить быстродействие и чувствительность защиты от коротких замыканий на цепях питания и в обмотках электродвигателя.

Ключевые слова: режимы работы электродвигателя, пуск, самозапуск, аварийный режим, идентификация аварийных режимов, субгармонические процессы, короткое замыкание, микропроцессор.

Для цитирования: *Минакова Т. Е., Маларев В. И., Коржев А. А.* Метод распознавания режимов работы асинхронных электродвигателей горных производств по субгармоническим параметрам // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 96–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_96.

Method to identify operating regimes of asynchronous drivers by subharmonic parameters in mining

T.E. Minakova[1], V.I. Malarev[1], A.A. Korzhev[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: Minakova_TE@pers.spmi.ru

© Т.Е. Минакова, В.И. Маларев, А.А. Коржев. 2022.

Abstract: The article proposes the protection method for asynchronous drivers in mining based on the identification of starting and self-starting by the presence of subharmonic parameters in transient processes in phase currents and by their absence in emergency modes (short circuits). This principle of functioning allows a priori discrimination between the emergency modes, with action acceleration given there are no subharmonic parameters, and the normal operating modes, with the increased currents of starting (self-starting) but with no protection relay actuation in case of initiation of subharmonics. The outcome of identification of subharmonic parameters in transient processes is the cardinal change of the adjustment procedure of starting and self-starting protectors without increased current-related actuation settings. The algorithm and mathematical formalization are proposed to identify subharmonic components of currents. The modeling of the starting mode and short circuit failure in MATLAB Simulink shows that it is necessary and sufficient to compare amplitudes of phase currents in 5–6 periods to provide correct operation of the proposed method. Accordingly, this method ensures disengagement of drivers in emergency modes in 100–120 ms. Thus, the method makes it possible to enhance the response speed and sensibility of short circuit failure protection in power supply circuits and in coils of electric drivers.

Key words: driver operating modes, starting, self-starting, emergency mode, emergency mode identification, subharmonic processes, short circuit, microprocessor.

For citation: Minakova T. E., Malarev V. I., Korzhev A. A. Method to identify operating regimes of asynchronous drivers by subharmonic parameters in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11):96-108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_96.

Введение

Современные технологические процессы промышленных производств, и особенно — предприятий добычи и переработки минеральных, сырьевых и топливных ресурсов, требуют развитых систем привода машин и механизмов. Доминирующая доля таких приводов выполняется на базе электродвигателей. Среди них наибольшей надежностью, коэффициентом полезного действия, простотой эксплуатации обладают асинхронные двигателями [1]. Распознавание режимов работы асинхронных электродвигателей, сокращение времени работы двигателей в аварийных режимах работы (а соответственно, минимизация размеров повреждений и разрушений) и быстрое отключение двигателей при переходе в аварийный режим работы — эксплуатационное требование, обеспечивающее эффективность производственной деятельности предприятия. Большинство аварийных и ненормальных режимов работы электродвигателя, таких как внешние короткие замыкания (КЗ), замыкания в обмотках статора, заклинивания ротора диагностируются по факту увеличения тока статорной обмотки [2].

Режимы работы электрических двигателей приводов горных машин (в открытых и подземных выработках) характеризуются резкими изменениями нагрузки в широком диапазоне с набросами нагрузки, происходящими из-за отличий физико-механических свойств различных пород и полезных ископаемых, например, неоднородностей и включений в породы. Следствием этого являются частые пуски электрических двигателей привода, работа в условиях кратковременных перегрузок, самозапуски. В таких режимах уровни рабочих токов электропривода близки к уровням

токов короткого замыкания, но отключение недопустимо. Токовые защиты приходится отстраивать от повышенных значений [3], снижая, таким образом, их чувствительность. Поэтому чувствительность и надежность срабатывания простой токовой защиты (токовой отсечки) бывает недостаточной, что ведет к повышению размеров повреждений при коротких замыканиях.

Использование микропроцессорных устройств защиты и управления открывает возможности дополнения алгоритмов функционирования средств защиты и автоматики новыми методами обработки сигналов датчиков [4] для идентификации режимов работы электродвигателя не только по абсолютным значениям основных параметров режимов, но и по характеру протекания процессов. В этой связи разработка метода распознавания режимов работы электродвигателей является актуальной.

Методы

Рассмотрим электромагнитные и электромеханические переходные процессы при подключении электродвигателей к питающей сети в режимах пуска и самозапуска, когда скорость ротора увеличивается от нуля или остаточной величины до номинального значения. В каждой из фаз статора токи имеют принужденную периодическую (с частотой источника питания) и апериодические составляющие. Первая из них создает магнитное поле, а соответственно электродвижущие силы (ЭДС) и токи с частотой источника питания (ω_0), а соответственно вращающий электромагнитный момент. Электромагнитное поле от апериодических составляющих тока обмотки ротора в процессе разгона создает генераторные электродвижущие силы и пропорциональные им токи с частотой, пропорциональной частоте вращения ротора [5]. Следовательно, суммарное электромагнитное поле статора складывается из полей номинальной частоты (источника питания), а также вращающегося поля ротора, изменяющего при пуске частоту от нуля до номинального значения [6]. Индуцируемая в статоре ЭДС разворачивающегося ротора с апериодическими составляющими токов проявляется, таким образом, в генерации субгармонической составляющей ЭДС (а соответственно токов статора) при переходных электромеханических процессах пуска и самозапуска двигателя (рис. 1). Наличие субгармонической составляющей в токах статорных обмоток, таким

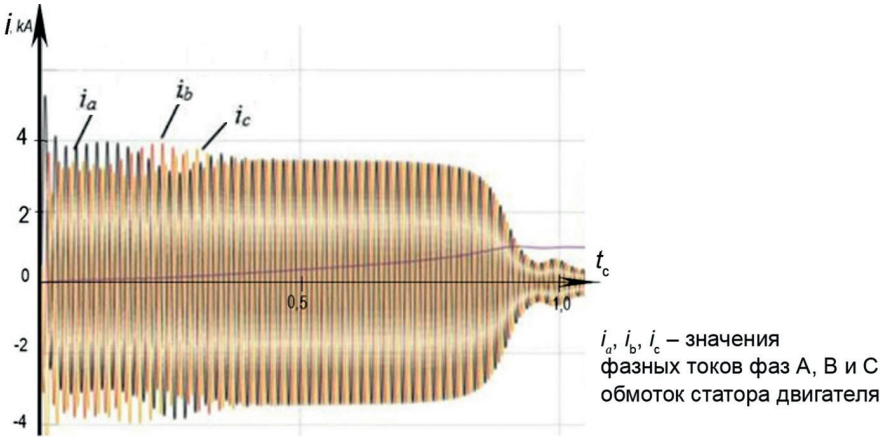

Рис. 1. Осциллограмма пускового режима электродвигателя мощностью 630 кВт
Fig. 1. Oscillogram of starting mode of electric driver (capacity 630 kWт)

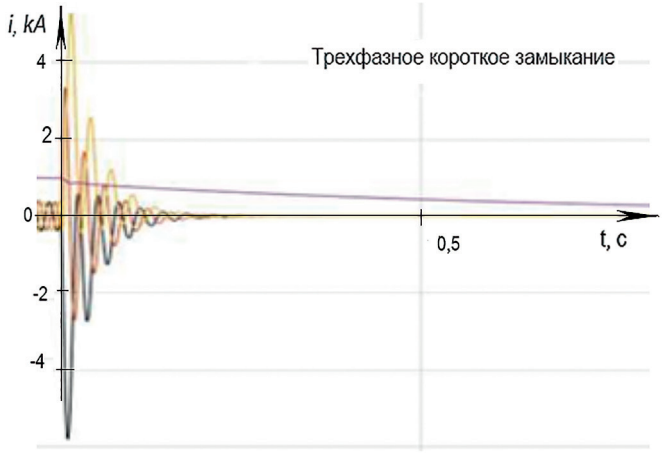

Рис. 2. Осциллограмма параметров режима двигателя при коротком замыкании
Fig. 2. Oscillogram of electric driver behavior in short circuit failure

образом, является идентификационным признаком разгона ротора электродвигателя.

В режимах КЗ поле статора определяется затухающим магнитным полем [7], а соответственно, ЭДС, наводимой в обмотках статора с частотой вращения, близкой к синхронной, либо синхронной, если датчик тока преобразует первичный ток источника питания (рис. 2).

В основу предлагаемого способа защиты электродвигателей может быть положена зависимость характера изменения токов от электромеханического состояния [8]. Действительно, при коротких замыканиях (рис. 2) характер зависимости токов определяется доминирующим влиянием электромагнитных параметров переходных процессов, в частности, апериодических составляющих токов:

$$i(t) = i(0) \cdot \left(1 - e^{-t/Ta}\right), \qquad (1)$$

где $i(0)$ — начальное значение апериодического фазного тока (для каждой фазы — собственное численное значение), А; T_a — постоянная времени затухания апериодических электромагнитных составляющих токов КЗ, с; t — текущий момент времени, с.

Соответственно, возбуждаемые ими магнитные потоки и электродвижущие силы при КЗ также имеют апериодический характер, равно как и характер изменения амплитуд свободных периодических составляющих токов, как это видно на рис. 2 [9].

В случае же повышений токов до соизмеримого уровня амплитуд в режимах пусков и самозапусков изменение состояния электродвигателя характеризуется нарастанием частоты вращения ротора [10], а следовательно, синхронным нарастанием и снижением амплитуд токов с частотой, пропорциональной частоте вращения (субгармоническими составляющими токов), как это видно на осциллограммах пуска (рис. 1) и самозапуска (рис. 3).

При самозапуске наличие субгармонических составляющих проявляется в течение меньшего интервала времени, если при самозапуске ротор разворачивается не с нулевой скорости, а уже имеет достаточно большую частоту вращения. Уверенность распознавания режима самозапуска определяется временем бестоковой паузы и, соответственно, снижением скорости вращения ротора. При времени перерыва электроснабже-

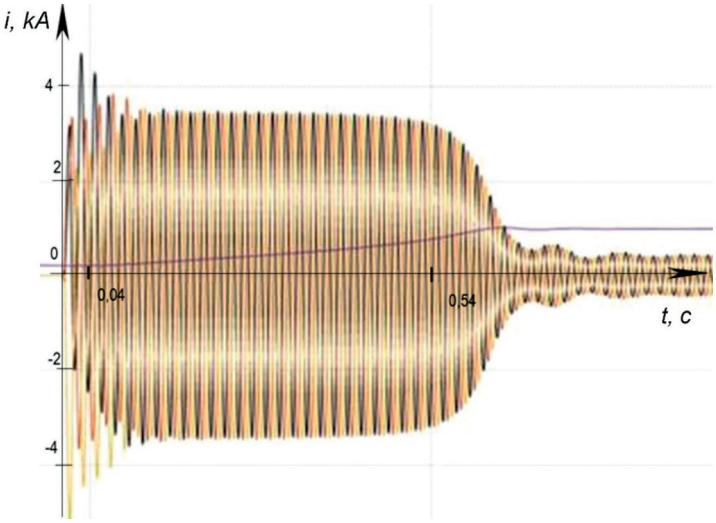

Рис. 3. Осциллограмма режима самозапуска электродвигателя мощностью 630 кВт
Fig. 3. Oscillogram of self-starting mode of electric driver (capacity 630 kWт)

ния более 1 с режим самозапуска четко идентифицируется аналогично режиму пуска и действие токовой защиты блокируется на заданное время пуска.

При монотонном снижении амплитуд фазных токов (режим короткого замыкания) [11] необходимо ускоренное срабатывание защиты электродвигателя. Предлагается критерий идентификации такого процесса:

$$I_m(t_1+\Delta t)<I_m(t_1)\bigcap I_m(t_2+\Delta t)<I_m(t_2), \quad (2)$$

где I_m — максимальное за период значение тока, А; t_1 — время начала измерения, с; t_2 — начало следующего периода измерения, с; Δt — длительность периода измерения, с.

Наоборот, при знакопеременном изменении амплитуд периодических составляющих фазных токов (режим пуска) необходимо блокировать срабатывание защиты электродвигателя.

$$I_m(t_1+\Delta t)<I_m(t_1)\bigcap I_m(t_2+\Delta t)>I_m(t_2). \quad (3)$$

Моделирование режимов пуска и короткого замыкания в среде MATLAB Simulink [12] показало, что для корректной работы данного способа необходимо и достаточно сравнить амплитуды фазных токов за 5–6 периодов. Следовательно, данный способ будет обеспечивать необходимое быстродействие в 100–120 мс.

Для реализации предлагаемого алгоритма определяется разность амплитудных значений положительных и отрицательных полуволн на первом и последующем периодах колебания тока. В случае сохранения знака разности (режим короткого замыкания) необходимо ускоренное отключение электродвигателя, а при изменении знака (режим пуска или самозапуска) — блокировка срабатывания защиты [13]. Для корректной работы средств защиты на основе данного метода идентификация субгармонических составляющих переходных процессов производится во время затухания апериодических составляющих тока [14]. Поэтому выполнение описанных выше действий должно выполняться в течение 120 мс после повышения тока до уровня пускового.

Исполнение алгоритма запускается в момент регистрации токовым реле превышения значения уставки срабатыва-

ния. Далее алгоритм продолжает работу в условиях затухания апериодических составляющих тока (в течение 0,12 с). В течение следующих 0,02 с (продолжительность периода принужденной составляющей тока) происходит запись мгновенных значений фазного тока статора в одномерный массив a_1, a_2, ... , a_n [15].

В среде имитационного моделирования MATLAB Simulink при проверке работоспособности и отладке данного алгоритма [16] шаг снятия значений тока определялся параметрами вычислителя (Solver). При реализации данного алгоритма защиты предполагается использование микропроцессорных устройств, шаг дискретизации которых определяется, в том числе, тактовой частотой процессора [17]. Для высокой точности работы алгоритма рекомендуется использование высокопроизводительных микропроцессорных устройств. В течение следующих 0,02 с операция повторяется, но запись значений происходит в одномерный массив b_1, b_2, ... , b_n [5].

Для каждого из полученных массивов данных a_1, a_2, ... , a_n [7] и b_1, b_2, ... , b_n [7] определяются как максимальные значения — $I_{max\ n}$ и $I_{max\ n+1}$ соответственно, так и минимальные — $I_{min\ n}$ и $I_{min\ n+1}$.

После этого происходит вычисление разности максимального и минимального элементов для каждого из массивов:

$$I_{sh\ n} = I_{max\ n} - \left|I_{min n}\right|; \qquad (4)$$

$$I_{sh\ n+1} = I_{max\ n+1} - \left|I_{min n+1}\right|, \qquad (5)$$

где I_{sh} — значение субгармонической составляющей токов, А; n — номер текущего отсчета при дискретном измерении токов.

Далее происходит сравнение знаков полученных разностей $I_{sh\ n}$ и $I_{sh\ n+1}$. Если знаки полученных переменных совпадут, защита подает сигнал на отключение выключателя без выдержки времени. В обратном случае подается сигнал блокировки выключателя на время пуска электродвигателя.

Результаты

Имитационная модель для проверки алгоритма работы защиты электродвигателя имеет два уровня: управления и электропитания. Система электроснабжения включает в себя источник трехфазного синусоидального напряжения, силовой трансформатор, линию электропередачи (ЛЭП), высоковольтный трехфазный асинхронный электродвигатель и коммутаторы. Модель уровня управления (рис. 4) включает в себя формирователь сигналов (Signal Builder), блок определения минимальных и максимальных значений (MinMax Running Resettable), блок нахождения модуля числа (Abs), блоки вычитания, компараторы, умножители, блоки ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (XOR), ИЛИ (OR), НЕ (NOT), И (AND) и блок памяти (Memory).

Блок формирования сигналов «Signal Builder» (на имитационной модели системы управления — блок 1) используется для выделения первых (в течение 120 мс с момента начала работы алгоритма) двух периодов колебаний тока статора (рис. 4). На выходе блок формирует два сигнала, смещенных друг относительно друга на 0,02 с (период основной частоты питающего напряжения) и длительностью 0,02 с каждый [18]. Умножитель умножает значение сигналов в относительных единицах на значения фазных токов. Массивы исходных данных a_n и a_{n+1} формируются из полученных после умножения значений. При помощи блоков определения минимальных и максимальных значений «MinMax Running Resettable» (на имитационной модели — блок 2) в каждом из массивов определяется элементы с минимальным и максимальным значени-

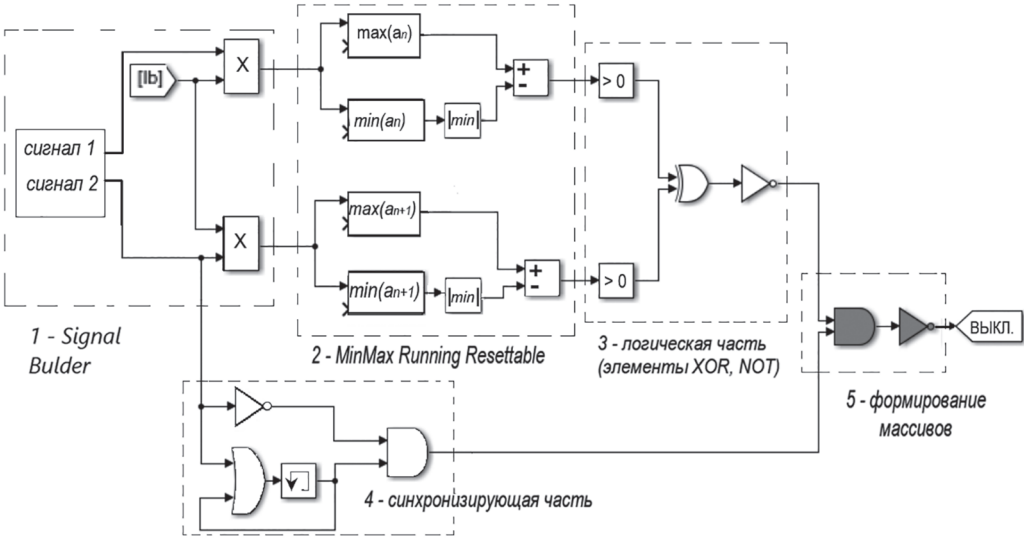

Рис. 4. Имитационная модель уровня управления
Fig. 4. Simulation model of control

ем $I_{sh\ n}$ и $I_{sh\ n+1}$ в соответствии с формулами (4) и (5).

Логическая часть схемы, определяющая монотонность фазного тока статора, выделена в блок 3, при этом используются элементы XOR (ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ) и инверсия (NOT). Сравниваются полученные разности $I_{sh\ n}$ и $I_{sh\ n+1}$ и при одинаковых знаках величин на выходе формируется логическая 1 (режим короткого замыкания), а если знак меняется, то формируется логический 0, что свидетельствует о режиме пуска двигателя. Вспомогательная часть схемы, отвечающая за синхронизацию ее работы, выделена в блок 4 (рис. 4). Функция, отвечающая за формирование массивов только после окончания второго из рас-

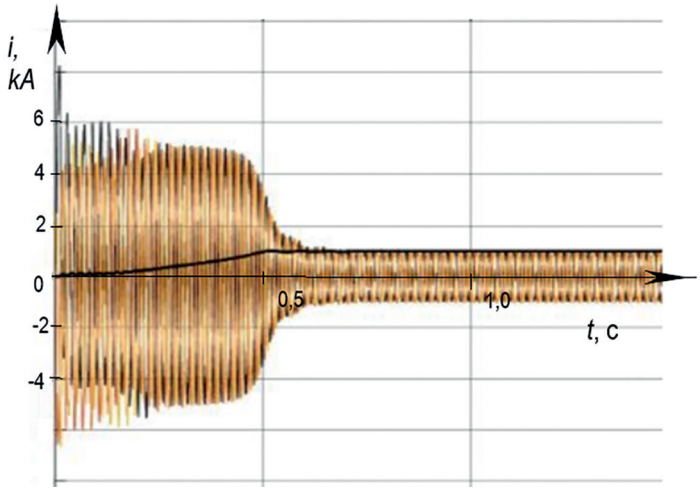

Рис. 5. Осциллограмма пуска двигателя с включенной защитой
Fig. 5. Oscillogram of starting of electric driver with actuated protection

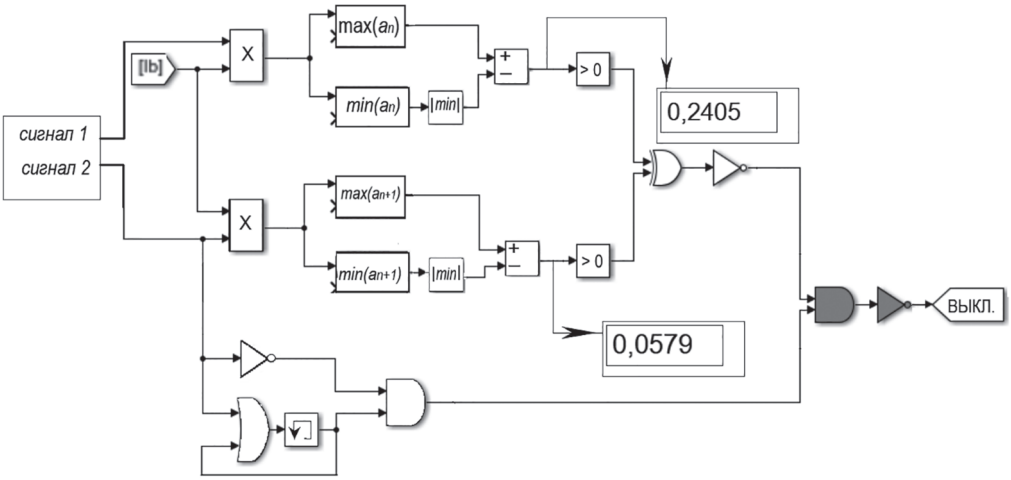

Рис. 6. Параметры функционирования в режиме пуска двигателя
Fig. 6. Functioning in starting mode of electric driver

сматриваемых периодов, отнесена к блоку 5 (элемент AND (И)).

Также в блоке 5 изображен элемент NOT (НЕ). Он используется для прозрачности имитационной модели. При наличии на выходе логической схемы «1» подается сигнал на нормально разомкнутый контакт [19], то есть силовая цепь замкнута. При наличии на выходе логического сигнала «0» — сигнал не подается, то есть происходит разрыв цепи.

Таким образом, силовая часть позволяет промоделировать работу электродвигателя, управляющая часть — работу алгоритма защиты электродвигателя.

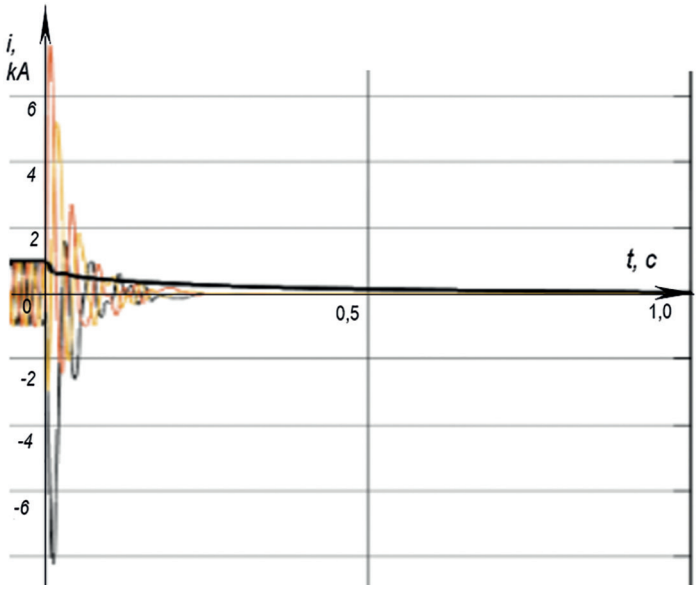

Рис. 7. Осциллограмма режима КЗ двигателя с включенной защитой
Fig. 7. Oscillogram of short circuit mode of electric driver with actuated protection

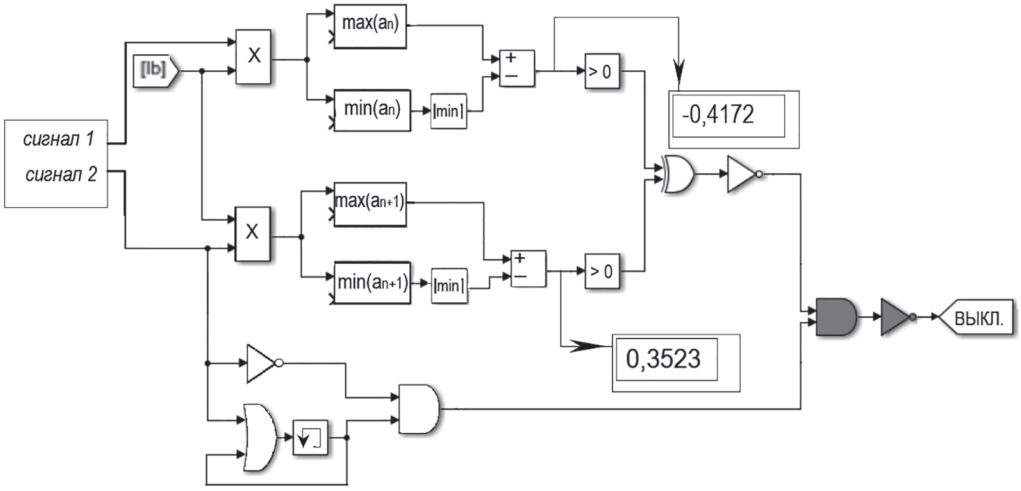

Рис. 8. Параметры функционирования защиты в аварийном режиме работы электродвигателя
Fig. 8. Protection functioning in emergency mode of electric driver

Обсуждение результатов

На основе описанной имитационной модели проведены опыты для проверки работоспособности метода: опыт работы электродвигателя без защиты, опыт пуска электродвигателя и опыт короткого замыкания [20]. В опыте работы электродвигателя в режиме самозапуска осциллограмма показывает, что электродвигатель запускается, происходит разгон электродвигателя до номинальной частоты вращения, при этом реакция защиты адекватна рабочему режиму (рис. 5) [21].

На рис. 6 представлены результаты моделирования, которые показывают, что полученные значения разности минимального и максимального токов за два периода колебания тока $I_{sh\ n}$ и $I_{sh\ n+1}$ имеют разный знак, что является признаком субгармонических колебаний, а соответственно признаком режима пуска электродвигателя. Таким образом, опыт (рис. 5) доказывает работоспособность алгоритма в режиме пуска электродвигателя.

В опыте короткого замыкания моделируется аварийный режим работы электродвигателя (рис. 7). Следует отметить, что уровни тока в режиме самозапуска и в режиме короткого замыкания не отличаются друг от друга.

Осциллограмма опыта короткого замыкания показывает срабатывание защиты. Работа логики защиты показана на рис. 8. В результате обработки данных о режиме работы логика схемы получила значения $I_{sh\ n}$ и $I_{sh\ n+1}$ одинакового знака за два периода колебаний, что является признаком отсутствия генераторной составляющей и, следовательно, аварийного режима.

Таким образом, свойство возникновения апериодических составляющих токов при переходных электромеханических процессах электрических двигателей, а под их воздействием — генераторных ЭДС при успешном развороте ротора является надежным признаком идентификации рабочих режимов в цепях релейной защиты.

Заключение

Предложенный метод защиты электродвигателя по признаку наличия генераторной составляющей позволяет идентифицировать аварийные режимы и режимы пуска электродвигателя при любых

соотношениях пускового тока и тока КЗ, кроме того, позволяет реализовать защиту от затянувшегося пуска, путем идентификации режима пуска и подачи сигнала на отключения после заданного времени пуска. Достоинством предложенного метода является быстродействие, которое не превышает 0,2 с, что очень важно для защиты ответственных электрических двигателей. Алгоритм защиты возможно реализовывать на микропроцессорной устройстве управления режимами двигателей, не устанавливая специальный блок защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малафеев С. И.*, *Малафеев С. С.* Информационные и управляющие компоненты электрических карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4. — С. 33—45. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.

2. *Turysheva A. V.*, *Gulkov Y. V.*, *Baburin S. V.* Power supply of oil production facilities using associated petroleum gas / Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020, pp. 1333—1338. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039526.

3. *Видулин П. П.*, *Нюхин Р. О.* Улучшение пусковых свойств серийного электродвигателя типа АИР56В2 / Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Сборник трудов научно-технической конференции. — Воронеж, 2019. — С. 48—52.

4. *Minakova T. E.* Improving reliability of power supply of mineral-raw-material complex // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012032.

5. *Минакова Т. Е.* Концепция развития микропроцессорных средств релейной защиты и автоматики предприятий горной промышленности на основе рэнкинговых алгоритмов / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. — 2017. — С. 178—181.

6. *Метельков В. П.*, *Либерман Я. Л.* К вопросу о выборе режима пуска ленточного конвейера // Электротехнические системы и комплексы. — 2019. — № 2(43). — С. 54—59. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-54-59.

7. *Belsky A. A.*, *Dobush V. S.*, *Ivanchenko D. I.*, *Gluhanich D. Y.* Electrotechnical complex for autonomous power supply of oil leakage detection systems and stop valves drive control systems for pipelines in arctic region // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012062.

8. *Ismagilov F. R.*, *Khairullin I. K.*, *Vavilov V. E.*, *Bekuzin V. I.*, *Gorbunov A. S.*, *Karimov R. D.* Energy losses in the electric motor of a high-speed spindle // Russian Engineering Research. 2017, vol. 37, no. 3, pp. 253—257. DOI: 10.3103/S1068798X17030091.

9. Kostin V. N., *Minakova T. E.* Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS subsystem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, no. 3, article 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032017.

10. *Коровкина Н. П.*, *Пустовалова Н. Н.*, *Кобринец В. П.*, *Горлов А. Н.* Изучение и оценка эффективности применения электродвигателей на приводах насосов и вентиляторов / Сборник научных статей по материалам II Международной научно-практической конференции. — Курск, 2021. — С. 6—10.

11. *Комиссаров С. Н.*, *Ворошилов И. В.* Замена пристраиваемых асинхронных двигателей для промышленных компрессоров на вентильно-индукторные электроприводы с системой управления преобразователем частоты на базе отечественного motorcontrol

микроконтроллера / Эффективное применение в проектах компрессорного, газоразделительного и энергосберегающего оборудования. Сборник трудов III-й научно-технической конференции. — Краснодар, 2021. — С. 85—90.

12. *Фаляхов А. К.* Модернизирование асинхронных двигателей регулируемого электропривода / Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы IV Национальной научно-практической конференции. — Казань, 2019. — С. 340—345.

13. *Архипов И. А.*, *Филин А. Э.* Анализ состояния аварийности на угольных предприятиях России // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 208—215. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-208-215.

14. *Baburin S. V.*, *Zyrin V. O.*, *Kovalchuk M. S.* Dependence of power supply systems reliability on the type of redundancy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 643, no. 1, article 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012134.

15. *Рясков Ю. И.*, *Шайтор Н. М.*, *Горпинченко А. В.* Обзор видов защиты асинхронных двигателей, используемых в энергетических системах и комплексах // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. — 2019. — Т. 22. — № 4. — С. 107—115.

16. *Петров В. Л.*, *Кузнецов Н. М.*, *Морозов И. Н.* Управление спросом на электроэнергию в горнопромышленном секторе на основе интеллектуальных электроэнергетических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 2. — С. 169—180. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_169.

17. *Киселев Д. Н.*, *Ершов Ю. А.* Микропроцессорная токовая защита // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 5. — С. 43—49.

18. *Киселев Д. Н.*, *Ершов Ю. А.* Микропроцессорная токовая защита на основе четырехмерного представления режимных параметров // Электротехника. — 2021. — № 7. — С. 28—31.

19. *Kostin V. N.*, *Minakova T. E.*, *Kopteva A. V.* Urban substations transformers allowed loading / Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. 2018, pp. 692–695. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317188.

20. *Шпенст В. А.*, *Тебуев М. И.*, *Тебуев Т. И.* Технология Power Line Communications (PLC). Устройство для подавления помех, возникающих при передаче информации по линиям электроснабжения // Естественные и технические науки. — 2018. — № 4(118). — С. 221—223.

21. *Дмитриева В. В.*, *Собянин А. А.*, *Сизин П. Е.* Моделирование плавного пуска для асинхронного двигателя ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6. — С. 77–92. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_105. ГИАБ

REFERENCES

1. Malafeev S. I., Malafeev S. S. Information and control elements of electric mining shovels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 33—45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.

2. Turysheva A. V., Gulkov Y. V., Baburin S. V. Power supply of oil production facilities using associated petroleum gas. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020.* 2020, pp. 1333—1338. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039526.

3. Vidulin P. P., Nyuhin R. O. Improvement of starting properties of series electric motor of type AIR56V2. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve. Sbornik trudov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Proceedings of the scientific and technical conference], Voronezh, 2019, pp. 48—52. [In Russ].

4. Minakova T. E. Improving reliability of power supply of mineral-raw-material complex. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012032.

5. Minakova T. E. Concept of development of microprocessor relay protection and automation of mining enterprises based on ranking algorithms. *Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroeniya i elektromekhaniki: IPDME-2017* [Innovations and prospects for the development of mining engineering and electromechanics: IPDME-2017. Proceedings of scientific and technical conference], 2017, pp. 178—181. [In Russ].

6. Metel'kov V. P., Liebermann J. L. The question of choosing the trigger mode of belt conveyor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*. 2019, no. 2(43), pp. 54—59. [In Russ]. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-54-59.

7. Belsky A. A., Dobush V. S., Ivanchenko D. I., Gluhanich D. Y. Electrotechnical complex for autonomous power supply of oil leakage detection systems and stop valves drive control systems for pipelines in arctic region. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012062.

8. Ismagilov F. R., Khairullin I. K., Vavilov V. E., Bekuzin V. I., Gorbunov A. S., Karimov R. D. Energy losses in the electric motor of a high-speed spindle. *Russian Engineering Research*. 2017, vol. 37, no. 3, pp. 253—257. DOI: 10.3103/S1068798X17030091.

9. Kostin V. N., Minakova T. E. Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS subsystem. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 3, article 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032017.

10. Korovkina N. P., Pustovalova N. N., Kobrinets V. P., Gorlov A. N. Study and evaluation of the effectiveness of the use of electric motors on the drives of pumps and fans. *Sbornik nauchnykh statey po materialam II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of scientific articles based on the materials of the II International Scientific and Practical Conference], Kursk, 2021, pp. 6—10. [In Russ].

11. Komissarov S. N., Voroshilov I. V. Replacement of attachable asynchronous motors for industrial compressors with valve-inductor electric drives with a frequency converter control system based on the domestic «motorcontrol» microcontroller. *Effektivnoe primenenie v proektakh kompressornogo, gazorazdelitel'nogo i energosberegayushchego oborudovaniya. Sbornik trudov III-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Effective use of compressor, gas separation and energy saving equipment in projects. Collection of works of the III scientific and technical conference], Krasnodar, 2021, pp. 85—90. [In Russ].

12. Falyakhov A. K. Upgrade of asynchronous motors of adjustable electric drive. *Priborostroenie i avtomatizirovannyy elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaystve. Materialy IV Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services. Materials of IV National Scientific and Practical Conference], Kazan, 2019, pp. 340—345. [In Russ].

13. Arhipov I. A., Filin A. E. Accident rate analysis in coal mines in Russia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 1, pp. 208—215. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-208-215.

14. Baburin S. V., Zyrin V. O., Kovalchuk M. S. Dependence of power supply systems reliability on the type of redundancy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 643, no. 1, article 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012134.

15. Ryaskov Yu. I., Shaitor N. M., Gorpinchenko A. V. Overview of asynchronous motor protection used in power systems and complexes. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 107—115. [In Russ].

16. Petrov V. L., Kuznetsov N. M., Morozov I. N. Electric energy demand management in mining industry using smart power grids. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 169—180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_169.

17. Kiselev D. N., Ershov Yu. A. Microprocessor-based current protection. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 5, pp. 43—49. [In Russ].

18. Kiselev D. N., Yershov Yu. A. Microprocessor-based current protection based on a four-dimensional representation of operating parameters. *Elektrotekhnika*. 2021, no. 7, pp. 28—31. [In Russ].

19. Kostin V. N., Minakova T. E., Kopteva A. V. Urban substations transformers allowed loading. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*. 2018, pp. 692–695. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317188.

20. Shpenst V. A., Tebuev M. I., Tebuev T. I. Power Line Communications (PLC) technology. A device for suppressing interference that occurs when information is transmitted through power supply lines. *Natural and technical sciences*. 2018, no. 4(118), pp. 221—223. [In Russ].

21. Dmitrieva V. V., Sobyanin A. A., Sizin P. E. Modeling soft start of belt conveyor induction motor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 77–92. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_107.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Минакова Татьяна Евгеньевна[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Minakova_TE@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5776-1917,
Маларев Вадим Игоревич[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Malarev_VI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7947-2200,
Коржев Александр Александрович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Korzhev_AA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2258-3561,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Минакова Т.Е., e-mail: Minakova_TE@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

T.E. Minakova[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
Minakova_TE@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5776-1917,
V.I. Malarev[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: Malarev_VI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7947-2200,
A.A. Korzhev[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: Korzhev_AA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2258-3561,
[1] Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: T.E. Minakova, e-mail: Minakova_TE@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 28.04.2022; получена после рецензии 20.09.2022; принята к печати 10.10.2022.
Received by the editors 28.04.2022; received after the review 20.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.