



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-70>

УДК 621.316.575

**Моделирование защиты от несимметричных режимов работы высоковольтного асинхронного привода циркуляционного компрессора в установке гидроочистки топлив**В. В. Дмитриева  , А. Б. Хамматов 

РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

 dm-valeriya@yandex.ru**Аннотация**

В нефтегазовой промышленности большую роль играют непрерывные технологические процессы, например, нефте- и газопереработка, которые чувствительны к многим внешним факторам. Такие процессы требуют реализации специальных процедур для остановки и повторного пуска. Для наладки технологического процесса необходимы очистка всей системы от непрореагировавших компонентов и их удаление. Забракованное сырьё зачастую сбрасывается на факел, что влечет за собой ощутимые экологические проблемы и значительный экономический ущерб. Важную роль в обеспечении непрерывных технологических процессов в нефтегазовой промышленности играют электротехнические системы (ЭТС), одним из ключевых элементов которых являются электродвигатели. Большую часть, не менее 80 %, используемых сегодня в промышленности электрических машин, составляют асинхронные двигатели (АД). Безаварийная их работа является одной из ключевых задач, что обеспечивает актуальность проектирования, моделирования и анализа действия систем релейных защит асинхронного двигателя, включая несимметричные режимы их работы. Эти режимы могут возникнуть при несимметричных схемах включения АД, несимметрии питающего напряжения, а также в результате каких-либо неисправностей в самой машине. Работа двигателя в таких условиях приведет к сокращению срока его службы, снижению мощности, износу и старению изоляции. В качестве исследуемого объекта выбран асинхронный электропривод циркуляционного компрессора блока гидроочистки бензина в комбинированной установке гидроочистки топлив, расположенного на Астраханском газоперерабатывающем заводе (АГПЗ). Для исследования работы и его защит авторы использовали моделирование в программе Matlab. В качестве основного теоретического метода выбран метод симметричных составляющих. Авторы разработали модель асинхронного электропривода циркуляционного компрессора; сформировали комплекс релейных защит (РЗ) и разработали модели следующих защит: «фильтр симметричных составляющих» (ФСС), максимальная токовая защита обратной последовательности «МТЗ $I_{\max \text{обр}}$ », защита от перегрузки. Продемонстрировано, что указанный комплекс релейной защиты полностью защищает двигатель от несимметричных режимов работы. Авторами было проведено исследование работы комплекса защит при различных несимметриях питающего напряжения, при различной нагрузке двигателя, сделан вывод о работоспособности разработанной защиты, а также даны рекомендации по его технической реализации на производстве. Выполненная работа может быть положена в основу разработки и тестирования релейной защиты элементов всей электротехнической системы установки гидроочистки топлив на Астраханском ГПЗ.

Ключевые слова

асинхронный двигатель, несимметричные режимы работы, несимметрия питающего напряжения, релейная защита, структурное моделирование, фильтр симметричных составляющих, максимальная токовая защита, защита от перегрузки, Sepam1000+, Matlab, Simulink

Для цитирования

Dmitrieva V. V., Khammatov A. B. Simulation of protection against unbalanced high-voltage asynchronous drive of recycle compressor in fuel hydrotreating unit. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):245–259. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-70>



POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Simulation of protection against unbalanced high-voltage asynchronous drive of recycle compressor in fuel hydrotreating unitV. V. Dmitrieva  , A. B. Khammatov 

I. M. Gubkin Russian State Oil and Gas University, Moscow, Russian Federation

 dm-valeriya@yandex.ru**Abstract**

In the oil and gas industry, continuous processes such as oil and gas refining play a great role and are sensitive to many external factors. Such processes require special procedures for stopping and restarting. In order to maintain a sustainable process, the entire system needs to be cleaned by removing of unreacted components. Rejected raw materials are often dumped into a flare leading to tangible environmental problems and significant economic disadvantages. Electrotechnical systems (ETS) play an important role in ensuring continuous technological processes in oil and gas industry. Electric motors are one of the key elements of ETS. The majority of the electrical machines used in industry today are Asynchronous motors (AM) – no less than 80 %. Ensuring their trouble-free operation is one of the key factors in the design, simulation, and analysis of asynchronous motor relay protection systems, including unbalanced conditions of their operation. These conditions can occur due to unbalanced AM connection circuits, supply voltage unbalance, or as any faults in a machine itself. Operating a motor under these conditions will result in shorter motor life, reduced power, wear and aging of the insulation. The study subject was an Asynchronous motor drive of a recycle compressor of a gasoline hydrotreating unit at the fuel hydrotreating integrated unit at the Astrakhan Gas Refining Plant (AGRP). The authors used Matlab simulations to study the facility and its protection systems/devices operation. The method of symmetrical components was selected as the main theoretical method. The authors developed a model of an asynchronous motor drive of a recycle compressor. This involved establishing a set of relay protections (RP) and developing the models of the following protections: sequence filter (symmetrical component filter) (SF), negative sequence (nps) O/C protection, and overload protection. It was demonstrated that the specified relay protection complex fully protects the motor from unbalanced operation conditions. The authors conducted a study of the protection complex operation under different supply voltage unbalances, with different motor loads. They formed a conclusion about the performance of the developed protection complex, and gave recommendations for its technical implementation in a business environment. The study findings can be used as a basis for the development and testing of relay protection components of the entire electrical system of the fuel hydrotreating unit at the Astrakhan Gas Refining Plant.

Keywords

asynchronous motor, unbalanced conditions of operation, unbalanced supply voltage, relay protection, structural simulation, sequence filter, negative sequence O/C protection, overload protection, Sepam1000+, Matlab, Simulink

For citation

Dmitrieva V.V., Khammatov A.B. Simulation of protection against unbalanced high-voltage asynchronous drive of recycle compressor in fuel hydrotreating unit. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):245–259. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-70>

Введение. Постановка задачи

В нефтегазовой промышленности большую роль играют непрерывные технологические процессы, например, нефте- и газопереработка, которые чувствительны к многим внешним факторам. Такие процессы требуют реализации специальных процедур для остановки и повторного пуска. Для наладки технологического процесса необходимы очистка всей системы от непрореагировавших компонентов и их удаление. Забракованное сырьё зачастую сбрасывается на факел, что влечет за собой ощутимые экологические проблемы и значительный экономический ущерб. Важную роль в обеспечении непрерывных технологических процессов в нефтегазовой промышленности играют

электротехнические системы (ЭТС), одним из ключевых элементов которых являются электродвигатели. Большую часть, не менее 80 %, используемых сегодня в промышленности электрических машин составляют асинхронные двигатели (АД). Обеспечение безаварийной их работы является одной из ключевых задач, что обеспечивает актуальность проектирования, моделирования и анализа действия систем релейных защит асинхронного двигателя, включая несимметричные режимы работы.

В данной статье рассматриваются проектирование и моделирование работы нескольких релейных защит от несимметричных режимов работы асинхронного двигателя [1]. Причинами возникновения



таких режимов могут быть как внешние, например, несимметрия подаваемого на двигатель напряжения [2], так и дефекты в самой машине. Если несимметрия возникает из-за изъянов в цепи ротора двигателя, то вращающий момент равен сумме моментов прямой M_1 и обратной M_2 последовательностей:

$$M(s) = M_1 + M_2, \quad (1)$$

и эта зависимость будет иметь провал при скольжении $s \approx 0,5$. Поскольку поле обратной последовательности неподвижно относительно статора, оно не создает в статоре токов и, следовательно, момент, обусловленный этим полем, будет равен нулю. При $0 \leq s \leq 0,5$ магнитное поле будет вращаться относительно статора в обратном направлении, а момент M_2 будет действовать на ротор в направлении движения. При $0,5 \leq s \leq 1$ поле вращается относительно статора в прямом направлении, а созданный этим полем момент M_2 будет действовать на ротор против направления вращения. При значительной несимметрии сопротивлений во вторичной цепи двигатель не достигнет нормальной частоты вращения. Максимально этот эффект проявляется при обрыве одной фазы ротора.

Если причиной несимметричного режима работы АД является несимметрия напряжений, подводимых к обмотке статора ($U_{AB} \neq U_{BC} \neq U_{CA}$), то не равны между собой будут и фазные напряжения ($U_A \neq U_B \neq U_C$). Влияние несимметрии [3] на работу асинхронного двигателя исследуется методом симметричных составляющих. При несимметричном питании из-за влияния обратной последовательности снижаются максимальный $M_{\max}$ и пусковой $M_{\text{пуск}}$ моменты двигателя и возрастает скольжение s при неизменном нагрузочном моменте. Кроме того, при питании двигателя несимметричным напряжением снижается КПД, увеличиваются потери, а следовательно, и нагрев двигателя, который влияет на срок службы изоляции обмоток. Например, при несимметрии напряжений в 2 % срок службы АД из-за дополнительных потерь активной мощности сокращается на 10 %. По этой причине при сильной несимметрии напряжения приходится снижать мощность двигателя. Из всего вышесказанного следует, что работа асинхронного двигателя при несимметричном питающем напряжении нежелательна, а исследование систем защит асинхронного двигателя является актуальной задачей.

В настоящее время в России показатели качества электрической энергии согласно национальному техническому стандарту ГОСТ 32144–2013 нормируются коэффициентом несимметрии по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательности. Для указанных показателей качества максимально допустимыми являются значения 2 % и 4 %, которые усреднены в интервале времени 10 мин в течение 95 % и 100 % времени на протяжении одной недели¹.

Описание объекта исследования

В качестве исследуемого объекта выбран асинхронный электропривод циркуляционного компрессора блока гидроочистки бензина в комбинированной установке гидроочистки топлив, расположенного на Астраханском газоперерабатывающем заводе (АГПЗ). Исследование несимметричных режимов работы двигателя рационально вести на мощных двигателях, так как влияние несимметрии в таком случае будет выражено лучше.

Установка гидроочистки предназначена для гидроочистки 2 млн т/год прямогонной широкой бензиновой фракции НК-180 °С (с возможным утяжелением конца кипения до 230 °С), вырабатываемой из астраханского газоконденсата, широкой фракции лёгких углеводородов (ШФЛУ) и бензина-отгона с блока гидроочистки дизельной фракции. Количество часов работы блока – 8000 ч в год. Режим работы блока – непрерывный. Технологическая схема процесса гидроочистки бензина представлена на рис. 1. Технологической схемой блока гидроочистки бензина предусматривается:

- гидроочистка исходного сырья на алюмо-кобальт-молибденовом катализаторе;
- холодная сепарация газосырьевой смеси;
- стабилизация гидрогенизата;
- газовоздушная регенерация катализатора;
- очистка водородсодержащего газа и углеводородного газа диэтаноломином;
- ингибиторная защита от коррозии.

На рис. 1 указаны основные технологические узлы процесса – реактор, колонны-стабилизаторы, механические фильтры, насосы, теплообменники, сепараторы, емкости для хранения (Е-306). Направление движения фракции бензина НК-180 указано стрелками. Исследуемым узлом является **циркуляционный компрессор**, который нагнетает водородсодержащий газ для получения газосырьевой смеси, которая затем проходит различные технологические циклы – нагрев, гидрирование, стабилизацию, охлаждение, и полученный в результате гидрогенизат выводится за пределы установки.

Управление технологическими процессами блока гидроочистки бензина и промпарком блока гидроочистки бензинов с насосной осуществляется с единого рабочего места оператора-технолога автоматизированной системой управления (АСУ ТП). АСУ ТП представляет собой иерархический многофункциональный промышленный, проектно-компонруемый программно-технический комплекс (ПТК) на базе микропроцессорных средств с модульной архитектурой [4]. Система обеспечивает оперативный контроль и управление всеми технологическими операциями установки, сбор, накопление, обработку и отображение информации о ходе технологического процесса, стабилизацию основных параметров, сигнализацию работы оборудования и положения арматуры, блокировку и защиту установки от аварийных ситуаций, аварийную сигнализацию, диагностику неисправности технических средств.

¹ ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во Стандартов; 2014. 15 с.

Система электроснабжения блока гидроочистки бензина включает в себя распределительный пункт, схема которого представлена на рис. 2. Схема включает в себя:

- ЦК-1, ЦК-2 – циркуляционные компрессоры ВСГ 2ГЦ2-47/35-44М УХЛ4 (в комплекте с панелью управления сухими газодинамическими уплотнениями 1000/TF/LB/D00908). В качестве приводов установлены асинхронные электродвигатели 4 АЗМП-2000/6000 УХЛ4 ($U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}$; $P_{\text{ном}} = 2000 \text{ кВт}$; $n = 3000 \text{ об/мин}$; взрывозащита IExdIIBT4);

- Н-1/1, Н-1/2, Н-1/3 – насосы центробежный нефтяной с плоским разъемом корпуса секционный 1НПС-Е200/700. В качестве приводов установлены асинхронные электродвигатели ИВАО-560S-4Y2,5-Т. Перерабатываемый продукт – бензиновая фракция. Данные насосы служат для подачи бензиновой фракции на блок гидроочистки;

- УК-1 – конденсаторная установка ($U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}$; $Q = 450 \text{ кВАр}$) предусмотрена в схеме для компенсации реактивной мощности, выделяемой на электродвигателях ЦК-1(ЦК-2);

- 1Т, 2Т – силовые двухобмоточные трёхфазные трансформаторы ТСЗЛ-1600/6/0,4 для питания низковольтной нагрузки трансформаторной подстанции.

Методы исследования

Для исследования работы асинхронного двигателя при несимметричных режимах воспользуемся математическим моделированием, в качестве моделирующей программы будем использовать пакет программ *Matlab* [5, 6]. При составлении математической модели АД будем традиционно использовать метод симметричных составляющих [7].

Наиболее актуальным способом защиты электродвигателей является разработка технических средств

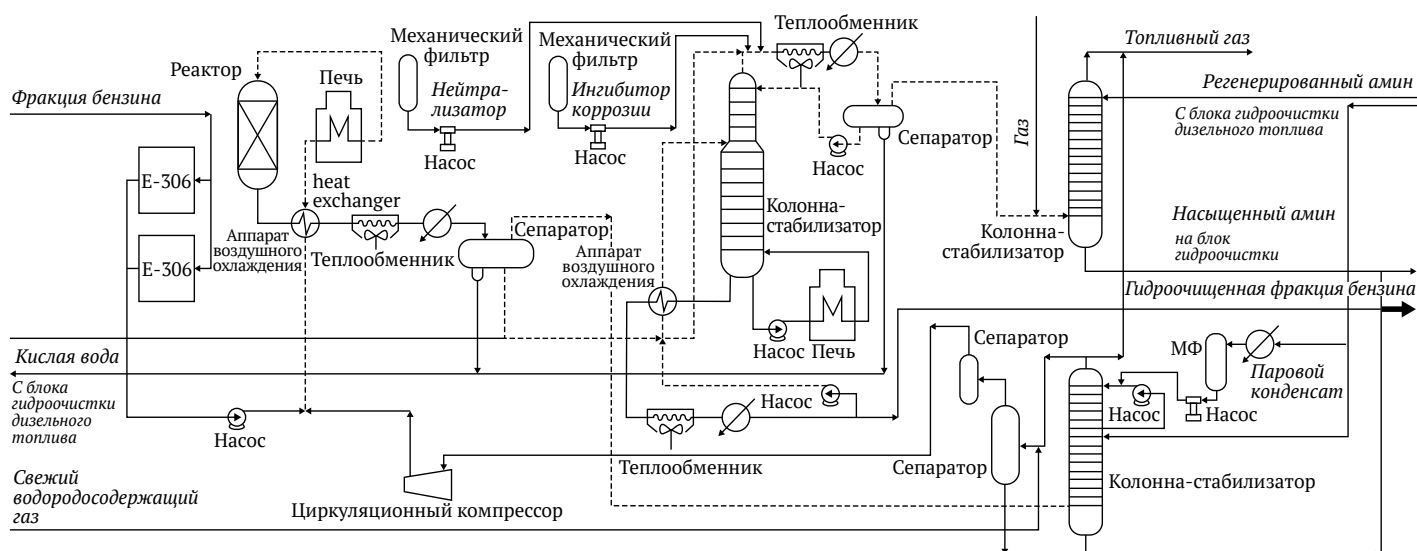


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема установки гидроочистки бензиновой фракции

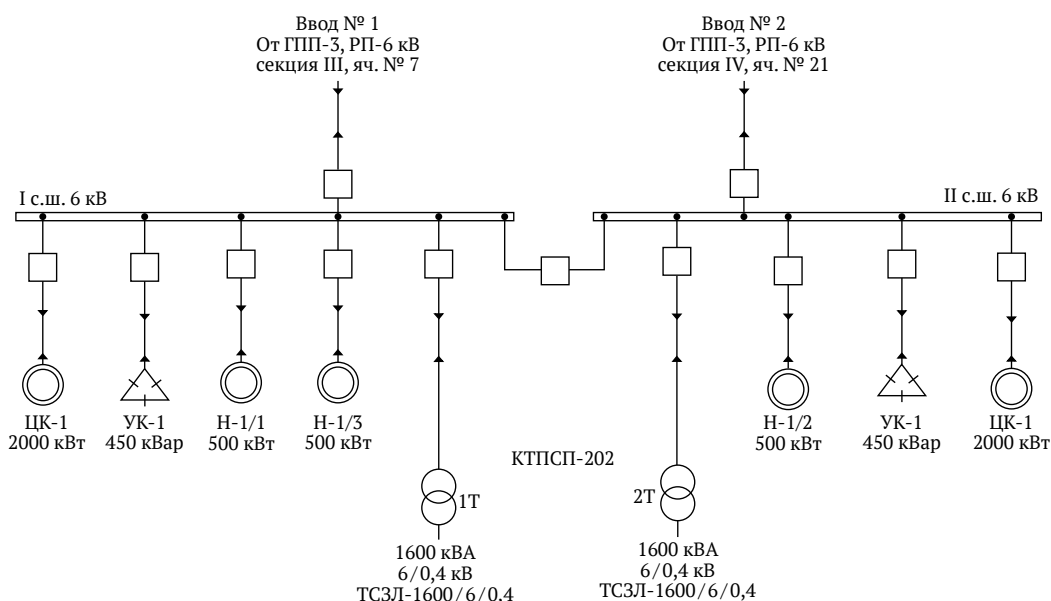


Рис. 2. Схема электроснабжения блока гидроочистки бензина



защиты [8], для оценки которых рассматриваются сложность их конструкции, экономичность, точность действия и надёжность. Для того чтобы избежать технологического ущерба, связанного с несимметричным режимом работы асинхронного двигателя, необходимо применять различные способы защиты [9, 10], а поскольку рассматриваемый ненормальный режим работы будет влиять не только на двигатель, но и на саму защиту, то защиты должны обладать высоким уровнем надёжности [10, 11]. Способы защиты электродвигателей от повреждений при несимметричных режимах работы можно условно разделить на: профилактические и технические, подразумевающие разработку и внедрение современных средств защиты, выполненных на микропроцессорной базе [12, 13].

Для защиты электродвигателей от несимметричных и неполнофазных режимов могут использоваться устройства косвенного типа, срабатывающие при превышении температуры статорных обмоток (устройства встроенной температурной защиты, УВТЗ, фазочувствительная защита, ФЗ) и прямого действия, реагирующие на появление обратной или нулевой последовательности напряжения или тока [14, 15].

Так как косвенные защиты реагируют не на саму асимметрию, а на её следствие, их работа характеризуется большой погрешностью срабатывания, низкими надёжностью и быстродействием. Другими недостатками этих защит являются сложные схемы, большие массогабаритные данные и высокая стоимость. В связи с этим более перспективными являются устройства прямого действия – специальные устройства защиты на базе фильтров симметричных составляющих.

Устройства защиты АД от несимметрии питающего напряжения могут строиться на базе фильтров нулевой и обратной последовательности и реагировать на несимметрию токов или напряжений.

Рассмотрим достоинства и недостатки релейной защиты, выполненной на токовых реле. Токовые защиты с фильтрами обратной и нулевой последовательностей реагируют на все несимметричные режимы. Данные устройства контролируют ток, протекающий по фазным цепям статора, поэтому срабатывание защит, выполненных на их базе, не зависит от места подключения. Однако использование трансформаторов тока уменьшает надёжность защиты, увеличивает энергопотребление и массогабаритные показатели. Кроме того, из-за насыщения сердечника трансформаторов защиты имеют недостаточную точность срабатывания [16]. Для повышения чувствительности токовых фильтровых защит используют защиты с торможением.

Если защита выполняется на реле напряжения, то следует учесть, что реле напряжения не обладают универсальностью, поскольку фиксируют только одно нарушение. Для защиты АД наиболее целесообразно применение так называемых мониторов напряжения, контролирующих несколько видов аварий. Реализуют такие мониторы на базе микропроцессорных устройств. Они универсальны, высоконадежны, просты, недороги и обеспечивают своевременное отключение электродвигателя при возникновении несимметрии и неполнофазных режимов [12, 17].

В настоящее время на рассматриваемом объекте для обеспечения защиты электрического оборудования внедряется микропроцессорная защита Seram 1000+ серии 80.

Рассмотрим возможности Seram 1000+ в области защиты от несимметричных режимов питания. Для защиты АД от перегрузок, вызванных несимметричным напряжением сети, используется защита минимального напряжения прямой последовательности $U^{(1)}$. Эта защита срабатывает, когда составляющая $U^{(1)}$ системы трехфазного напряжения становится меньше рассчитанной уставки срабатывания защиты U_{c3} . Защита от небаланса фаз реализуется путем измерения $U^{(2)}$. Выдержка времени у обеих защит – независимая.

Seram 1000+ для реализации данных защит работает на линейном или на фазном напряжении и позволяет отстроиться по коэффициенту несимметрии [14] по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U^{(2)}}{U^{(1)}} 100\%.$$

Для обеспечения защиты от несимметрии установлены уставки по коэффициенту обратной последовательности и по времени: $K_{2U} = 20\%$ и $t = 10$ с. К токовым защита, диагностирующим несимметричный режим работы, относятся максимальная токовая защита обратной последовательности, защита от перегрузки и тепловая защита. МТЗ обратной последовательности в соответствии с током обратной последовательности выдает значение коэффициента небаланса. Защита имеет зависимую и независимую выдержки времени. Защита от перегрузки и тепловая защита предназначены для защиты двигателя от перегрузок, которые могут быть вызваны несимметричной нагрузкой в рабочих режимах или ненормальными режимами сети. Стоит отметить, что они диагностируют последствия несимметрии, а не её саму, и, следовательно, являются менее точными.

Диапазон выбора уставок данных защит представлен в табл. 1².

Таблица 1

Диапазон уставок защит Seram 1000+ серии 80

Функция защиты	Диапазон уставок	Диапазон выдержки времени, с
Защита от несимметричного режима питающего напряжения	$K_{2U} = 0 \div 50\%$	0,05–300
МТЗ обратной последовательности с независимой Δt	22,3–1130 А	0,1–300
МТЗ обратной последовательности с зависимой Δt	22,3–1130 А	0,1–1
Защита от перегрузки с независимой Δt	1–6250 А	0,05–300
Защита от перегрузки с зависимой Δt	1–6250 А	0,1–12,5 для 2260 А
Тепловая защита	60–200°C	1–600 мин

² Руководство по установке и применению Seram 1000 + серии 80.



Разработка модели асинхронного двигателя и моделей средств его РЗ от несимметричного режима работы в пакете Matlab Simulink

Для моделирования АД воспользуемся блоком Asynchronous Machine в пакете Matlab Simulink [18]. Паспортные данные двигателя 4А3М-2000/6000 УХЛ4 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Паспортные данные двигателя
4А3М-2000/6000 УХЛ4

Мощность, кВт	2000
Частота вращения, об/мин	2973
Масса, кг	5600
Ток статора, А	226
Скольжение, %	0,9
КПД	96,7
Коэффициент мощности, о.е.	0,88
Краткость максимального вращающего момента	1,9
Краткость пускового вращающего момента	0,77
Краткость пускового тока	4,7

Основываясь на паспортных данных двигателя, рассчитаем значения параметров модели двигателя в пакете Matlab Simulink по методике, изложенной в [19], полученные параметры, нужные для моделирования, представим в табл. 3.

Таблица 3

Параметры модели двигателя
4А3М-2000/6000 УХЛ4 в Simulink

Приведённое активное сопротивление ротора, Ом	0,419724
Активное сопротивление статора, Ом	0,888812
Приведённая индуктивность рассеяния статора и ротора, Гн	0,003531
Индуктивность цепи намагничивания, Гн	0,127834
Момент инерции, кг·м ²	187,07

Модель защиты асинхронного двигателя от несимметричных режимов питающего напряжения основывается на существующей защите Seram 1000+. Уставки защиты, которые должны будут быть отражены в модели, приведем в табл. 4. Для моделирования несимметричной работы двигателя и средств его защиты от несимметрии собрана схема в пакете Matlab Simulink, представленная на рис. 3.

Таблица 4

Уставки моделей защит в пакете Matlab Simulink

	Срабатывание защиты	Отпускание	t_{cp} , с
Защита на базе ФСС	$K_{2U} = 8 \%$	$K_{2U_0} = 6 \%$	10
Защита от перегрузки	$I_{сз} = 350 \text{ А}$	$I_0 = 300 \text{ А}$	18
МТЗ обратной последовательности	$I_{сз \text{ обр посл}} = 60 \text{ А}$	$I_0 = 20 \text{ А}$	10

Пояснения по схеме моделирования асинхронного двигателя в Simulink:

1. Входное трехфазное напряжение формируется тремя однофазными источниками в виде элементов AC Voltage Source пакета SimPowerToolbox: амплитуда $A = 4898,98 \text{ В}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$; начальная фаза: 0° для фазы А, -120° для фазы В и 120° для фазы С.

2. Асинхронный двигатель: задан блоком Asynchronous Machine. Параметры блока выбираются в соответствии с табл. 3. Крутящий момент задаётся блоками Signal Builder, Constant, Product1 для плавного пуска двигателя.

3. Трёхфазный выключатель: задан блоком Three-Phase Breaker. Управление данным блоком осуществляется по сигналу, сопротивления в разомкнутом и замкнутом положении ключа сохраняются по умолчанию 10^6 и 10^{-2} Ом соответственно.

4. Измерители тока и напряжения заданы блоками Current Measurement и Voltage Measurement.

5. Блоки RMS1-RMS4 предназначены для измерения действующего значения тока или напряжения.

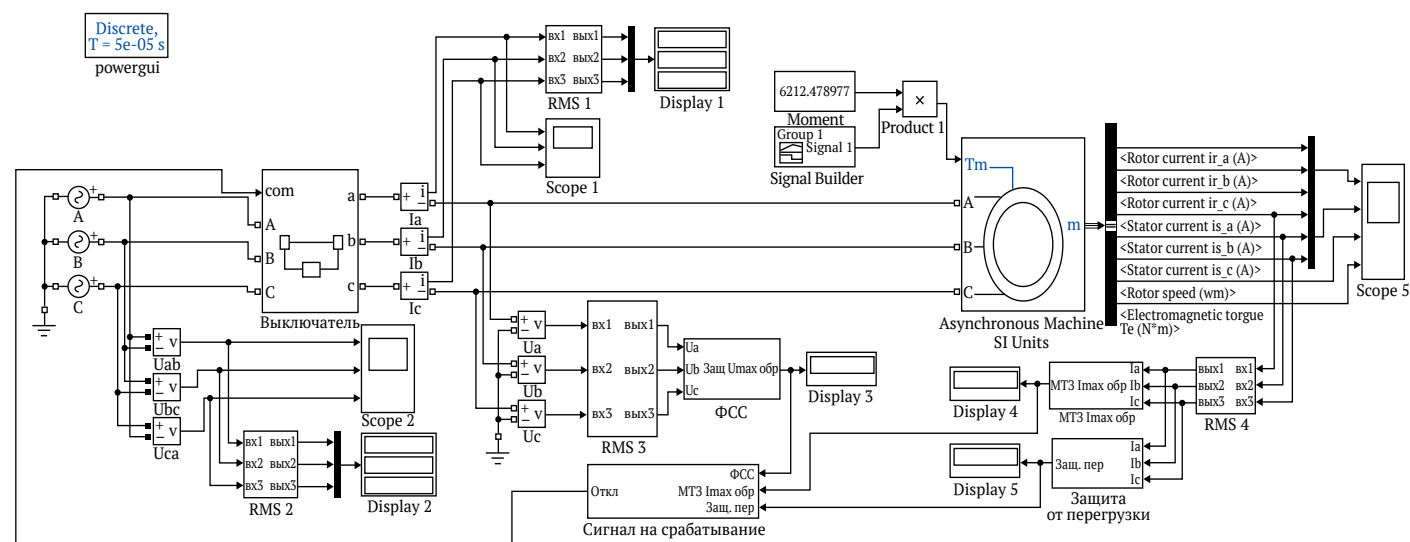


Рис. 3. Схема моделирования асинхронного двигателя в Simulink

6. Защита «фильтр-симметричных составляющих» (ФСС): входными величинами для блока являются действующие фазные напряжения, выходными – сигнал на срабатывание защиты и величина коэффициента несимметрии обратной последовательности по напряжению. Измеренные напряжения с помощью блока *Magnitude-Angle to Complex* переводятся в симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей. С помощью блока *Divide* производится вычисление K_{2U} , при превышении уставки, заданной блоком *Relay* $K_{2U} = 0,08$, с выдержкой времени 10 с подаёт сигнал на срабатывание защиты.

7. «МТЗ $I_{\max \text{ обр}}$ »: входными величинами являются действующие токи статора двигателя, выходным – сигнал на срабатывание. Аналогично ФСС, основываясь на измеренных линейных токах, получаем ток обратной последовательности, который сравнивается с уставкой, и при превышении уставки $I_{\text{ср}} = 60 \text{ A}$ с выдержкой времени 10 с подаёт сигнал на срабатывание защиты.

8. «Защита от перегрузки»: входными величинами являются действующие токи статора двигателя, выходным – сигнал на срабатывание. С помощью блока *MinMax* вычисляется максимальный действующий ток, который сравнивается с уставкой, и при превышении уставки $I_{\text{ср}} = 350 \text{ A}$ с выдержкой времени 18 с подаёт сигнал на срабатывание защиты.

9. «Сигнал на срабатывание»: входными величинами являются сигналы сработавших ФСС, «МТЗ $I_{\max \text{ обр}}$ » и защита от перегрузки, выходным – сигнал на срабатывание выключателя. С помощью блоков *Logical Operator 1–3* и *Monostable* производится размыкание выключателя, и так как это сопровождается отключением защит, не подается сигнал на включение двигателя, таким образом, не допускается закликивание моделирования.

Внутренняя структура указанных выше блоков составлена в соответствии с алгоритмами действия защит. Для более компактного и лаконичного представления все вышеуказанные защиты заключены в блоки *Subsystem*. В качестве примера на рис. 4 при-

ведем схему защиты «Фильтр симметричных составляющих».

Верифицировать разработанную модель двигателя и схемы его защиты можно, имитируя номинальный режим. Моделируя работу двигателя в номинальном режиме, получим переходные процессы, совпадающие с эталонными процессами асинхронного двигателя по фазным токам, линейным напряжениям, токам ротора и статора, скорости вращения ротора и электромагнитному моменту двигателя.

1. Линейные токи во время пуска ($t = 0–8 \text{ с}$) примерно в 6 раз больше номинальных, что соответствует паспортным данным двигателя. Далее, когда двигатель выходит на номинальные частоты вращения, токи снижаются и выходят на номинальные значения $I_{\text{ном}} = 226 \text{ A}$.

2. Линейные напряжения, соответствующие номинальному значению, в течение всего времени моделирования $U_{\text{ном}} = 6000 \text{ V}$.

3. Сигналы, формируемые моделями защит, демонстрируют, что при номинальном режиме защиты не срабатывают, формируя на своих выходах сигнал 0, такому режиму соответствует 1 на выходе блока «сигнал на срабатывание», так как при подаче такого сигнала на выключатель он замкнут.

Проверим работоспособность установленных защит, рассмотрев их работу при ненормальных режимах работы двигателя. Проведенные авторами опыты показали, что при повышении момента нагрузки на 50 % происходит срабатывание защиты от перегрузки, при этом остальные защиты не срабатывают, так как не возникает токов и напряжений обратной последовательности. По временным диаграммам видно, что срабатывание защиты в момент времени $t = 18 \text{ с}$.

Рассмотрим работу защит при изменении напряжения в одной из фаз. При увеличении напряжения в фазе А на 20 % вместе с несимметрией напряжений наступает несимметрия токов, но при заданном отклонении уровень коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2U} = 6,07 \% < K_{2U\text{max}} = 8 \%$ недостаточен, чтобы сра-

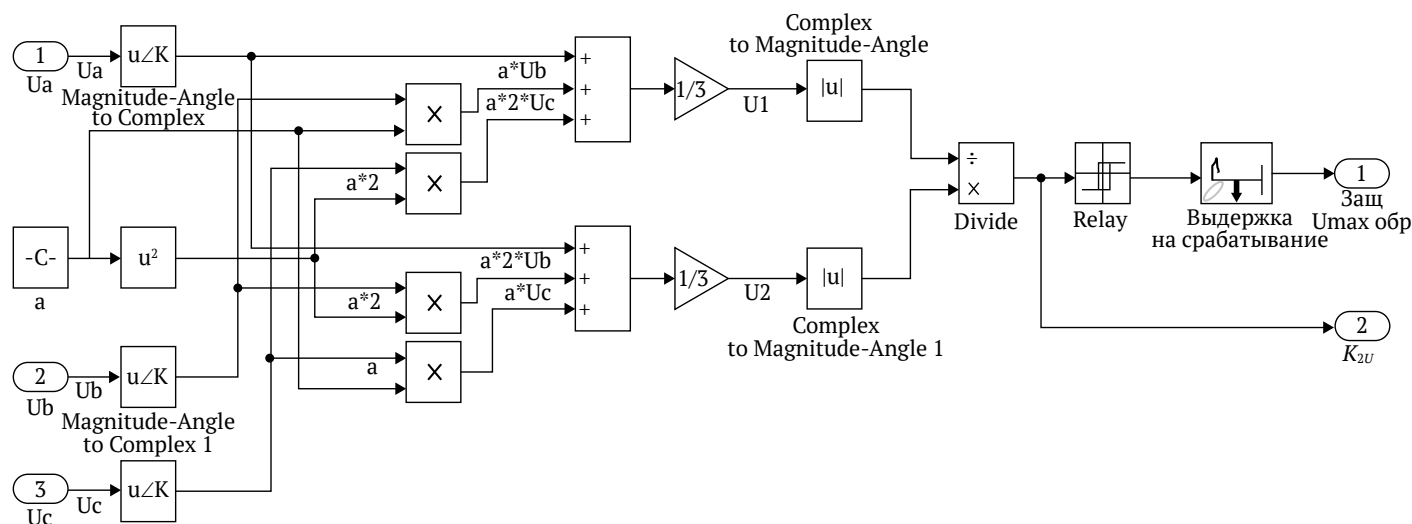


Рис. 4. Внутренняя структура блока ФСС



ботала соответствующая защита, но изменения токов достаточно, чтобы при пуске возник ток обратной последовательности, превышающий уставку МТЗ обратной последовательности $I_2 = 80 \text{ A} > I_{2\text{max}} = 60 \text{ A}$. По временным диаграммам видно, что срабатывание защиты в момент времени $t = 10 \text{ с}$. Защита от перегрузки не срабатывает, так как токи статора уменьшаются раньше уставки по времени $t = 18 \text{ с}$.

Если же напряжение в одной из фаз уменьшать, токи уменьшаются, но для того чтобы защита по напряжению обратной последовательности сработала, необходимо отклонение большее, чем 20 %. В данном случае $K_{2U} = 8,95 \% > K_{2U\text{max}} = 8 \%$, а следовательно, защита по несимметрии напряжения срабатывает, но при этом $I_2 = 50 \text{ A} < I_{2\text{max}} = 60 \text{ A}$, поэтому МТЗ обратной последовательности не срабатывает.

Мы видим, что защиты работают селективно и обеспечивают защиту двигателя от несимметричных режимов работы в пределах установленных уставок. Следовательно, разработанная цифровая модель позволяет исследовать работу двигателя при несимметричном питающем напряжении, а также диагностировать данные режимы с помощью защиты от перегрузки, МТЗ обратной последовательности и защиты на базе фильтра симметричных составляющих.

Результаты работы. Моделирование процессов при несимметричном питающем напряжении

Рассмотрим работу модели при несимметричном режиме питающего напряжения [20]. Варьируя напряжения в каждой фазе на величину $\Delta U = \pm 15 \% U_{\text{ном}}$, рассмотрим изменение токов и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} . Эти изменения напряжения представим на диаграмме на рис. 5. На этой диаграмме показан порядок изменения ΔU , %, в фазах при проведении 43 опытов. В легенде диаграммы разъяснено, каким цветом отображается каждая фаза. На этой же диаграмме представлено изменение коэффициента K_{2U} .

Далее на диаграмме на рис. 6 отобразим зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U} от отклонений напряжений в фазах.

На третьей диаграмме на рис. 7 представим зависимость токов в фазах двигателя I_a, I_b, I_c от несимметрии напряжений в фазах.

Интерес представляет также срабатывание промоделированных защит. Представим работу защит в табл. 5, в которой отобразим результаты наиболее показательной части опытов, тех, в которых защиты срабатывают.

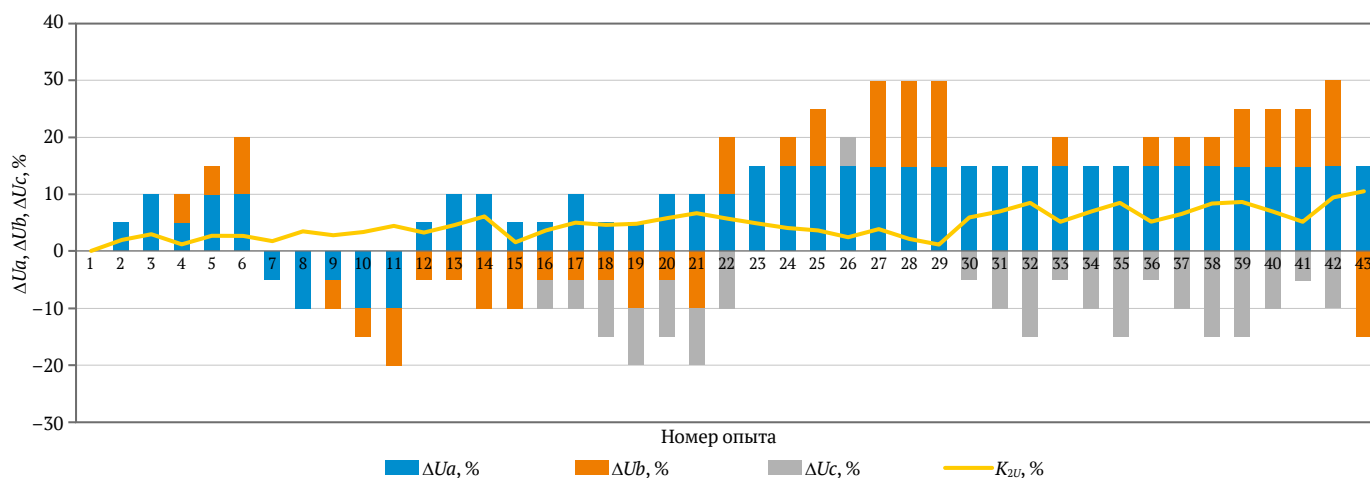


Рис. 5. Порядок изменения отклонений в фазах питающего напряжения

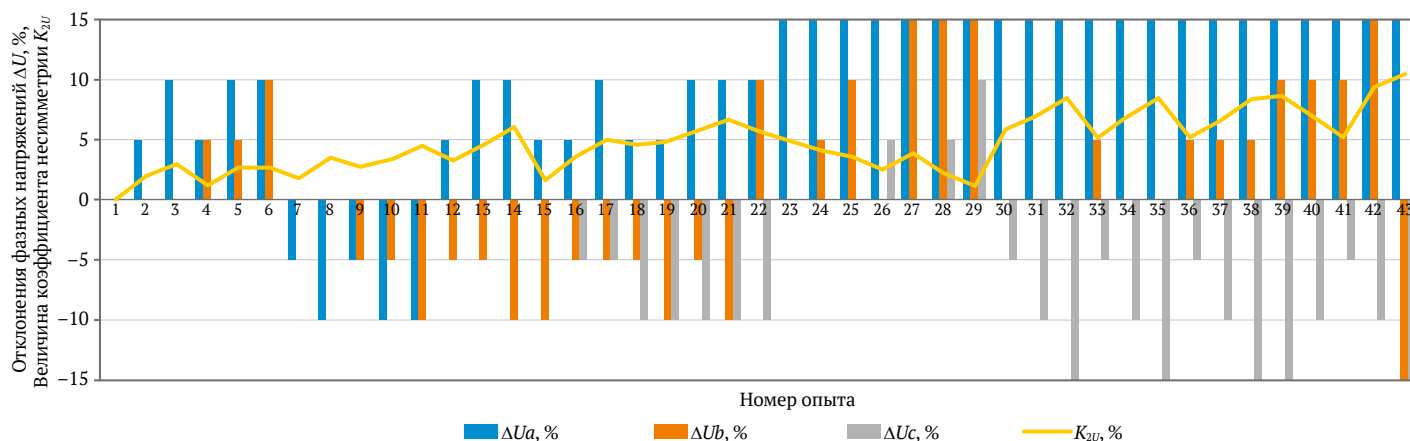


Рис. 6. Зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U} от отклонений напряжений в фазах ΔU , %



Анализ результатов

Пример результатов моделирования в Simulink приведен на рис. 8. По результатам моделирования видим, что при несимметричном режиме питающего напряжения чаще срабатывает МТЗ обратной последовательности. Это объясняется тем, что при изменении уровня напряжения даже в одной из фаз источника наблюдается изменение токов во всех фазах двигателя, что вызывает несимметрию токов и возникновение токов обратной последовательности [21]. При превышении тока обратной последовательности уровня уставки защиты с выдержкой времени происходит срабатывание защиты и питание отключается. По результатам моделирования можно заключить, что защита не всегда реагирует одинаково на одни и те же уровни несимметрии напряжения, например, при $K_{2U} = 4,9\%$ в одном случае ($\Delta U_a = 5\%$;

$\Delta U_b = 0\%$; $\Delta U_c = -10\%$) МТЗ обратной последовательности срабатывает, а в другом нет ($\Delta U_a = 15\%$; $\Delta U_b = 0\%$; $\Delta U_c = 0\%$). В случаях когда уровень несимметрии $K_{2U} > 5\%$, срабатывает МТЗ обратной последовательности, а при $K_{2U} > 8\%$ срабатывает также защита, выполненная на базе фильтра симметричных составляющих.

Проанализировав зависимость токов в фазах от коэффициента несимметрии, заметим, что значительная несимметрия токов возникает и при небольших значениях коэффициента несимметрии K_{2U} , а это означает, что для полноценной защиты двигателя помимо защиты на базе ФСС необходимо устанавливать МТЗ обратной последовательности, так как именно под действием токов обратной последовательности происходит нагрев двигателя, увеличиваются потери и вследствие этого уменьшается срок службы.

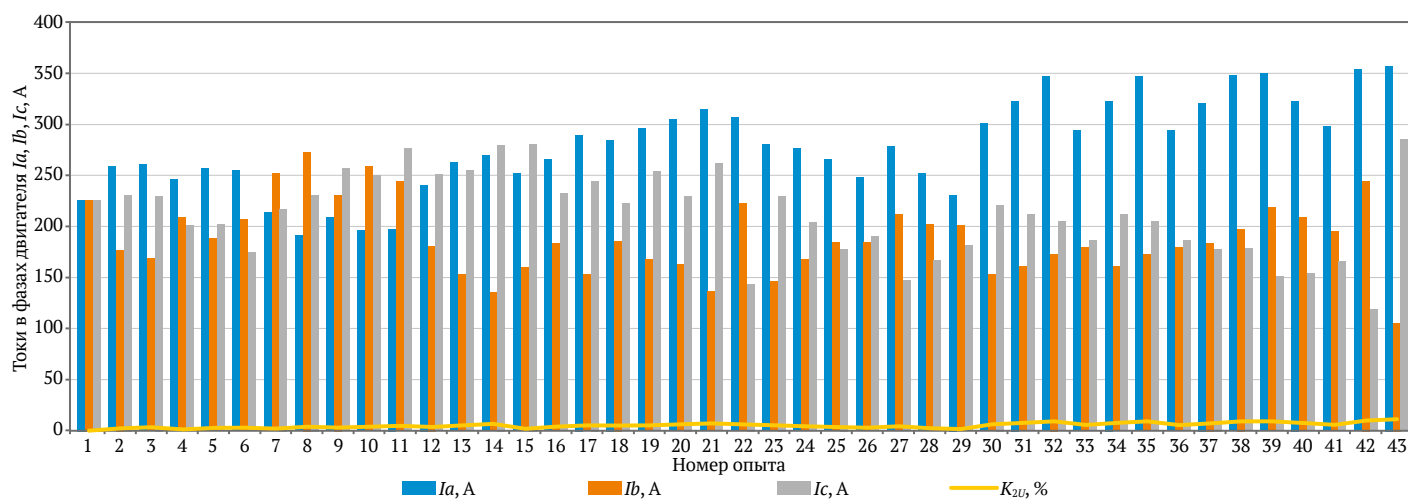


Рис. 7. Зависимость токов в фазах двигателя от коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U}

Таблица 5

Результаты моделирования работы АД при несимметричном питающем напряжении

Отклонения напряжений в фазах, %			Токи в фазах двигателя, А			$K_{2U}, \%$	Срабатывающая защита
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c	I_a	I_b	I_c		
10	-10	0	270	136	280	6,1	МТЗ обр. посл.
5	-10	-10	296	168	254	4,9	МТЗ обр. посл.
10	-5	-10	305	163	230	5,8	МТЗ обр. посл.
10	-10	-10	315	137	262	6,7	МТЗ обр. посл.
10	10	-10	307	223	144	5,7	МТЗ обр. посл.
15	0	-5	301	153	221	5,9	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	323	161	212	7	МТЗ обр. посл.
15	0	-15	347	173	205	8,5	МТЗ обр. посл., ФСС
15	5	-5	294	180	186	5,2	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	323	161	212	7	МТЗ обр.
15	0	-15	347	173	205	8,5	МТЗ обр. посл., ФСС
15	5	-5	294	180	186	5,2	МТЗ обр. посл.
15	5	-10	321	184	178	6,6	МТЗ обр. посл.
15	5	-15	348	198	179	8,4	МТЗ обр. посл., ФСС
15	10	-15	350	219	151	8,7	МТЗ обр. посл., ФСС
15	10	-10	323	209	154	7	МТЗ обр. посл.
15	10	-5	298	195	166	5,2	МТЗ обр. посл.
15	15	-10	354	245	119	9,4	МТЗ обр. посл., ФСС
15	-15	-15	357	106	285	10,5	МТЗ обр. посл., ФСС

Теперь рассмотрим, как влияет несимметрия напряжений на токи в фазах двигателя при различных нагрузках на валу. Для этого будем изменять нагрузку от 0 до 120 %. Пример результатов для холостого хода, номинального режима и перегрузки представим в табл. 6–8.

Важно отметить, что при нагрузке на валу двигателя в 120 % от номинальной нагрузки при отклонениях напряжений в фазах *A*, *B*, *C* на -10, -10 и 0 % соответственно происходит срабатывание защиты от перегрузки, поскольку даже небольшая несимметрия напряжений при перегрузке вызывает токи, превышающие уставку защиты.

По данным таблиц видно, что при одинаковых изменениях напряжений в фазах токи имеют большую несимметрию при больших коэффициентах загрузки, поскольку в более нагруженном двигателе возникают большие токи, а при несимметричном питающем напряжении величина этих повышенных токов оказывает большее влияние на несимметрию токов, вызывая больший ток обратной последовательности, следовательно, несимметричные режимы питающего напряжения недопустимы при больших нагрузках двигателя.

Рассмотрим теперь скорость вращения ротора и вращающий момент, создаваемый двигателем при различных несимметричных режимах питающего

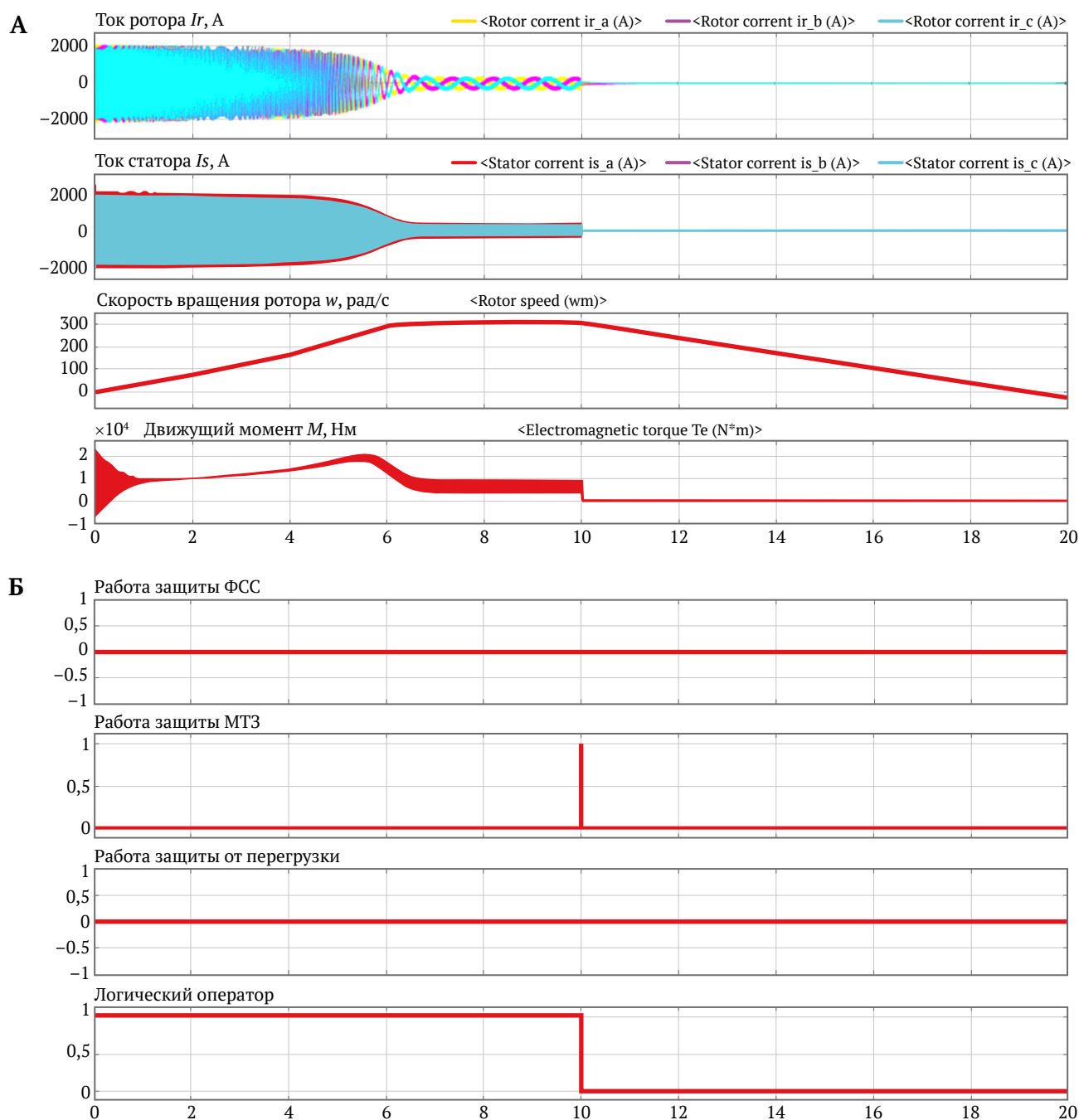


Рис. 8. Временные диаграммы: А – линейных токов ротора, токов статора, скорости вращения ротора и электромагнитного момента двигателя при увеличении напряжения фазы А на 20 %; Б – сигналов защит при увеличении напряжения фазы А на 20 %



напряжения в зависимости от времени. Исследовать будем работу двигателя с номинальной нагрузкой при изменении напряжения в фазах от номинального значения следующим образом:

1) отклонения напряжений в фазах: $\Delta U_a = 15\%$; $\Delta U_b = 10\%$; $\Delta U_c = 0\%$;

2) отклонения напряжений в фазах: $\Delta U_a = 10\%$; $\Delta U_b = 5\%$; $\Delta U_c = 0\%$;

3) отклонения напряжений в фазах: $\Delta U_a = -15\%$; $\Delta U_b = -5\%$; $\Delta U_c = 0\%$;

4) отклонения напряжений в фазах: $\Delta U_a = -10\%$; $\Delta U_b = 0\%$; $\Delta U_c = 0\%$.

В рассматриваемых режимах двигатель успевает выйти на устойчивый режим работы до срабатывания защиты от перегрузки, а МТЗ обратной последовательности и защита на базе ФСС не срабатывают, поэтому для более наглядного исследования рассматриваются токи статора и ротора, а также скорость вращения ротора и вращающий момент двигателя за 13 с моделирования. Результаты моделирования представлены в табл. 9. Пример графиков изменения токов ротора, токов статора, скорости вращения и вращающего момента асинхронного двигателя при рассматриваемых коэффициентах несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} представлены на рис. 9.

На представленных рисунках видно, что при нарушении симметрии питающего напряжения возникает несимметрия токов, а следовательно, и ток обратной последовательности, который нарушает нормальный режим работы двигателя, изменяя форму кривых токов статора и ротора, а также скоростей вращения ротора и вращающего момента двигателя, то есть создавая колебания этих величин. Возникшие колебания имеют большую амплитуду при большем коэффициенте несимметрии напряжения по обратной последовательности. Несимметричный режим напряжения негативно влияет на работу двигателя, так как при этом возникают колебания вращающего момента и скорости вращения ротора, в результате чего возникают вибрации, которые сокращают срок службы двигателя. Для более наглядного представления выведем на один график сигналы скорости вращения ротора и вращающего момента от параллельно работающих идентичных схем с различными соотношениями питающих напряжений, согласно табл. 9. Полученные графики изменения действующих значений скорости вращения и вращающего момента асинхронного двигателя при различных коэффициентах несимметрии напряжения по обратной последовательности представлены на рис. 10.

Таблица 6

Моделирование несимметричного режима работы двигателя при 100%-ной нагрузке

Отклонения напряжений в фазах, %			$K_{2U}, \%$	Токи в фазах двигателя, А			Срабатывание защиты
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c		I_a	I_b	I_c	
-10	-10	0	4	197,7	244,1	277,2	Защиты не срабатывают
10	-5	-10	6	304,8	162,8	229,9	МТЗ обр. посл.
15	0	-5	6	300,5	153,4	221,4	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	7	322,6	161,2	211,9	МТЗ обр. посл.
15	10	-15	9	350,2	219,1	151,0	МТЗ обр. посл., ФСС
15	-15	-15	11	356,9	106,0	285,2	МТЗ обр. посл., ФСС

Таблица 7

Моделирование несимметричного режима работы при нагрузке 0 %

Отклонения напряжений в фазах, %			$K_{2U}, \%$	Токи в фазах двигателя, А			Срабатывание защиты
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c		I_a	I_b	I_c	
-10	-10	0	4	81,6	23,5	117,7	Защиты не срабатывают
10	-5	-10	6	162,6	92,3	70,6	МТЗ обр. посл.
15	0	-5	6	178,4	120,3	58,8	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	7	192,8	145,6	56,4	МТЗ обр. посл.
15	10	-15	9	205,2	204,0	60,3	МТЗ обр. посл., ФСС
15	-15	-15	11	237,6	148,2	126,2	МТЗ обр. посл., ФСС

Таблица 8

Моделирование несимметричного режима работы при 120%-ной нагрузке

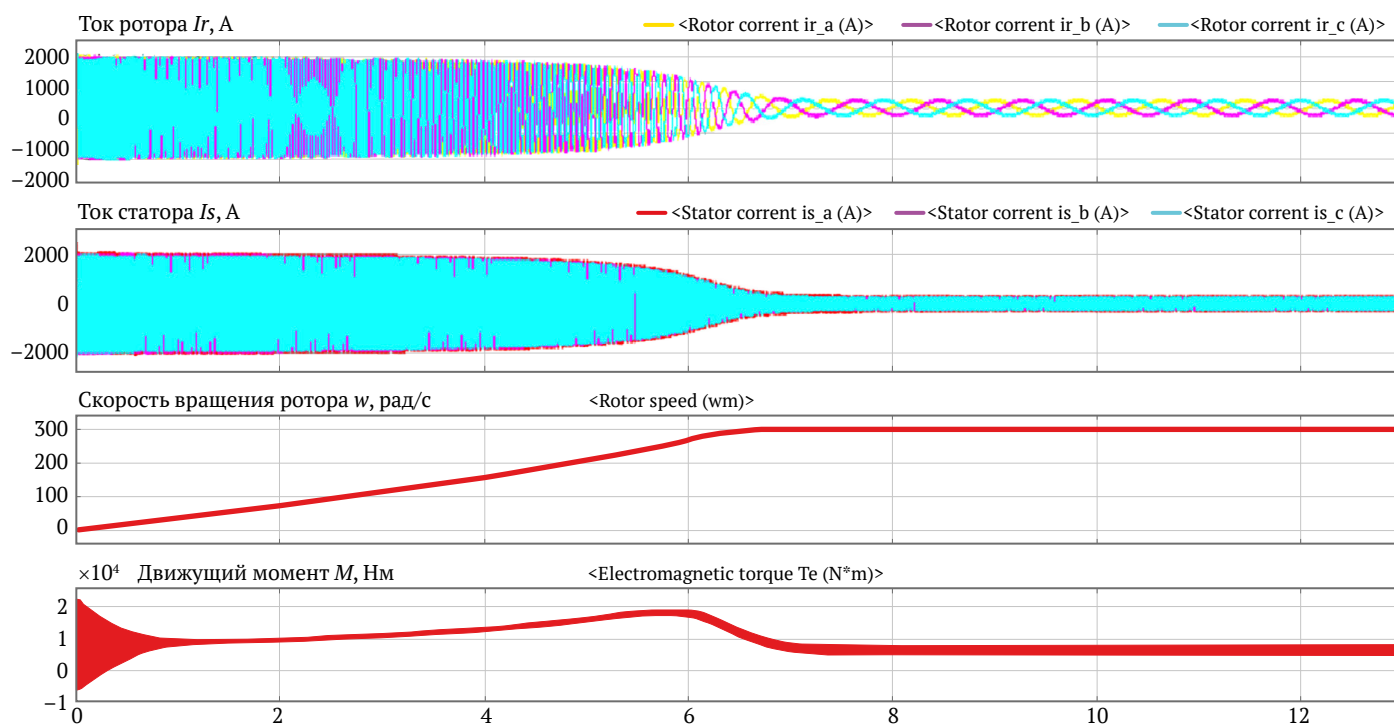
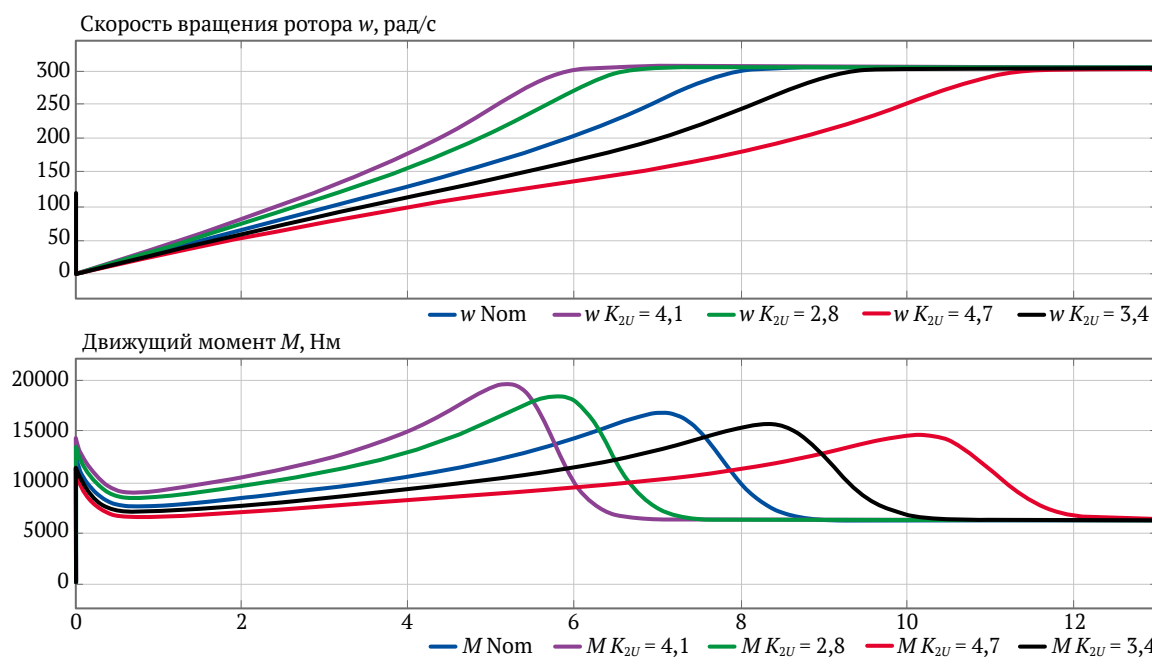
Отклонения напряжений в фазах, %			$K_{2U}, \%$	Токи в фазах двигателя, А			Срабатывание защиты
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c		I_a	I_b	I_c	
-10	-10	0	4	243,2	300,0	327,6	Защита от перегрузки
10	-5	-10	6	348,8	205,4	275,0	МТЗ обр. посл.
15	0	-5	6	341,6	192,2	261,7	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	7	365,1	198,9	250,3	МТЗ обр. посл.
15	10	-15	9	383,5	245,4	188,6	МТЗ обр. посл., ФСС
15	-15	-15	11	396,2	148,6	333,6	МТЗ обр. посл., ФСС



Таблица 9

Результаты моделирования для исследования динамических характеристик двигателя

Отклонения напряжений в фазах, %			Фазные напряжения, В			Токи в фазах двигателя, А			Коэффициент несимметрии K_{2U} , %
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c	ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c	I_a	I_b	I_c	
15	10	0	5634	5389	4899	274,1	196,2	181,7	4,1
10	5	0	5389	5144	4899	257,9	196,6	203,4	2,8
-15	-5	0	4164	4654	4899	184,9	292,7	262	4,7
-10	0	0	4409	4899	4899	198	277,5	232,2	3,4

**Рис. 9.** Графики изменения токов ротора, токов статора, скорости вращения и вращающего момента АД при коэффициенте несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2U} = 4,1$ %**Рис. 10.** Графики изменения действующего значения скорости вращения и вращающего момента АД при номинальном режиме работы ($K_{2U} = 0$ %) и коэффициентах несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2U} = 4,1, 2,8, 3,4, 4,7$ %



На графиках видно, что изменения скорости вращения ротора и вращающий момент двигателя зависят не столько от коэффициента несимметрии, сколько от характера изменения напряжения. При пониженном напряжении пуск двигателя более затруднен, он медленнее выходит на номинальную скорость вращения. Сравним графики изменения вращающего момента при $K_{2U} = 0, 4, 7, 3, 4 \%$. Так как при нормальном режиме питающего напряжения $K_{2U} = 0 \%$, то момент обратной последовательности не возникает $-M_2 = 0$, и момент двигателя полностью определяется моментом прямой последовательности $-M_{\text{ном}} = M_1$. Для оценки влияния несимметричного напряжения на вращающий момент двигателя будем считать, что при $K_{2U} = 4, 7, 3, 4 \%$ вращающий момент прямой последовательности приблизительно равен моменту при номинальном режиме работы двигателя. Данное утверждение обосновывается тем, что уровень напряжения в рассматриваемых случаях несильно отличается от номинального, а следовательно, характер кривых зависит от этого в меньшей степени. Так как при несимметричном питающем напряжении возникают токи обратной последовательности, возникает и момент обратной последовательности, имеющий отрицательное значение $M_2 < 0$, следовательно, результирующий момент, равный сумме моментов прямой и обратной последовательности $-M = M_1 + M_2 = M_{\text{ном}} + M_2$, будет снижаться при большем коэффициенте несимметрии, что ярко выражено на максимумах рассматриваемых кривых. Аналогичное суждение справедливо и для изменения вращающих моментов при $K_{2U} = 4, 1, 2, 48 \%$, но так как в данном случае несимметрия напряжения вводилась путём увеличения напряжений в фазах, вместе с напряжением выросли и токи как прямой, так и обратной последовательности, что вызвало увеличение соответствующих моментов. В таком случае при большем коэффициенте несимметрии момент становится больше по сравнению с номинальным. В заключение можно сделать вывод, что изменение симметрии напряжения сопровождается уменьшением результирующего вращающего момента, а сле-

довательно, увеличением потерь и снижением КПД двигателя, а также нагревом обмоток в результате возникновения токов обратной последовательности.

Выводы

Авторами проведено исследование защит высоковольтного асинхронного электропривода циркуляционного компрессора в установке гидроочистки топлив Астраханского ГПЗ. Исследования показали, что для защиты двигателя от несимметрии питающего напряжения должны быть выбраны релейные защиты ФСС, защита обратной последовательности и защита от перегрузки. Было выполнено моделирование совместной работы АД и его защит. Результаты проведенного исследования позволяют количественно оценить влияние несимметрии питающего напряжения на работу высоковольтного асинхронного двигателя. Анализ работы совокупности защит показал, что при несимметрии напряжений чаще срабатывает МТЗ обратной последовательности, так как возникает несимметрия токов. Авторами сделан вывод, что именно эта защита должна быть предусмотрена обязательно, поскольку следствие несимметричных режимов питания – несимметрия токов – создаёт момент обратной последовательности, который уменьшает КПД двигателя и сокращает его срок службы. Оценка работы защит при различных коэффициентах загрузки двигателя показала, что влияние несимметрии напряжений оказывает большее влияние на работу двигателя при больших коэффициентах загрузки. Проведенный анализ характеристик двигателя при различных несимметриях питающего напряжения позволил оценить изменения действующих значений скорости вращения и момента двигателя при различных коэффициентах несимметрии. Подтверждена возможность реализации разрабатываемой системы РЗ на базе микропроцессорной защиты Seram 1000+ серии 80.

Практическое применение выполненной работы заключается в том, что она может быть положена в основу релейной защиты всех элементов ЭТС установки гидроочистки топлив на Астраханском ГПЗ. В настоящее время авторами ведется дальнейшая разработка этой системы.

Список литературы

1. Panchenko V., Turenko A. Analysis of the influence of voltage asymmetry on the operation of the traction asynchronous electric motor using the simulation model. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*. 2021;(198):145–150. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>
2. Романова В.В., Хромов С.В., Бахтурин А.Г., Суслов К. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022;24(4):131–141. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141>
3. Шакиров В.А., Сыровешкин А.М., Буянина О.А. Исследование влияния несимметрии напряжений на работу асинхронных двигателей. *Труды Братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири*. 2011;2:8–11.
4. Дмитриева В.В., Авхадиев И.Ф., Сизин П.Е. Использование современных программно-технических комплексов для автоматизации конвейерных линий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2):150–163. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-150-163>
5. Ершов Ю.А., Малеев А.В. Моделирование микропроцессорных релейных защит в среде MATLAB. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2010;3(2):220–228. URL: https://elibrary.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/1672/09_ershov.pdf?sequence=1



6. Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А. Математическое моделирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора в среде Matlab Simulink. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(1):134–150. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-134-150>
7. Копылов И.П. *Математическое моделирование электрических машин*. М.: Высшая школа; 2001. 327 с.
8. Андреев В.А. *Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах*. М.: Высшая школа; 2008. 256 с.
9. Hou L., Li B., Hu X., Liu Ch. Research on motor relay protection of high-voltage variable frequency motor drive system. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2014;4(4):330–335. <https://doi.org/10.1080/22348972.2014.11011892>
10. Kuprienko V.V. Relay protection features of frequency-adjustable electric drive. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(5):052021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052021>
11. Popa G.N., Duinis C.M. Complex electronic protection for low-voltage three-phase induction motors. *WSEAS Transactions on Electronics*. 2020;11:11–17. <https://doi.org/10.37394/232017.2020.11.2>
12. Полищук В.И., Крицкий М.В., Баннов Д.М., Малышев С.В. Применение унифицированных блоков микропроцессорной релейной защиты в задачах диагностики электрических машин. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019;21(6):93–100. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100>
13. Neftisov A.V., Sarinova A.Zh., Talipov O.M. Possibility of building microprocessor relay protection devices on open architecture. *Bulletin of Toraigrov University. Energy Series* 2022;(3):277–292. <https://doi.org/10.48081/IKLZ1109>
14. Zeng Q., Zhang Zh., Xu M., Zhu J. A coordinated relay protection strategy of distribution network based on fault current limiting. *Energy Reports*. 2022;8(3):380–387. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.036>
15. Kholiddinov I.Kh., Misinova G., Yulchiev M.E., Tychiev Z.Z. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab). *The American Journal of Engineering and Technology*. 2020;2(10):33–37. <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume02Issue10-07>
16. Новобрицкий В.А., Федосов Д.С. Анализ работы устройств релейной защиты в переходном режиме, сопровождающемся насыщением трансформатора тока. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021;23(5):71–85. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-71-85>
17. Nedelchev N., Matsankov M. Increasing the sensitivity of the digital relay protection against turn-to-turn short circuits and asymmetries in wind power generators. In: *The 3rd International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE 2020)*. 2020;186(4):03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018603001>
18. Романова В.В., Хромов С.В. Построение компьютерной модели для исследования режимов работы асинхронного двигателя. В: *Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции «Развитие технических наук в современном мире»*. Вып. II. Воронеж, 08 декабря 2015 г. Воронеж: Изд-во ИЦРОН; 2015. С. 35–38.
19. Пантель О.В. Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в среде Matlab/Simulink. *Academy*. 2015;(2):7–11.
20. Немыкина В.В., Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А. Анализ несимметрии токов и напряжений в обмотках статора асинхронных двигателей привода вспомогательных машин. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2020;(4):85–92. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.4\(68\).85-92](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.4(68).85-92)
21. Суворов И.Ф., Сидоров А.И., Хромов С.В. Исследование влияния несимметрии линейных напряжений в сетях напряжением до 1000 В на режимы работы асинхронных электродвигателей. *Электробезопасность*. 2014;(3):17–30.

References

1. Panchenko V., Turenko A. Analysis of the influence of voltage asymmetry on the operation of the traction asynchronous electric motor using the simulation model. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*. 2021;(198):145–150. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>
2. Romanova V.V., Khromov S.V., Batukhtin A.G., Suslov K.V. Analysis of the degree of influence of supply voltage asymmetry on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2022;24(4):131–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141>
3. Shakirov V.A., Syrovoshkin A.M., Buyanina O.A. Study of the effect of voltage unbalance on the operation of asynchronous motors. *Trudy Bratskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye i Inzhenernye Nauki – Razvitiyu Regionov Sibiri*. 2011;(2:8):11. (In Russ.)
4. Dmitrieva V.V., Avkhadiev I.F., Sizin P.E. Use of advance hardware/software in multiple conveyor system automation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2):150–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-150-163>
5. Ershov Yu.A., Maleev A.V. Microprocessor Relay Protection Modeling in MATLAB. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2010;3(2):220–228. (In Russ.) URL: https://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/1672/09_ershov.pdf?sequence=1



6. Andreev M.V., Ruban N. Yu., Suvorov A.A. Mathematical modeling of digital differential transformer protection in Matlab Simulink environment. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(1):134–150. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-134-150>
7. Kopylov I.P. *Mathematical modeling of electric machines*. Moscow: Vysshaya Shkola; 2001. 327 p. (In Russ.)
8. Andreev V.A. *Relay protection of power supply systems in examples and tasks*. Moscow: Vysshaya Shkola; 2008. 256 p. (In Russ.)
9. Hou L., Li B., Hu X., Liu Ch. Research on motor relay protection of high-voltage variable frequency motor drive system. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2014;4(4):330–335. <https://doi.org/10.1080/22348972.2014.11011892>
10. Kuprienko V.V. Relay protection features of frequency-adjustable electric drive. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(5):052021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052021>
11. Popa G.N., Duinis C.M. Complex electronic protection for low-voltage three-phase induction motors. *WSEAS Transactions on Electronics*. 2020;11:11–17. <https://doi.org/10.37394/232017.2020.11.2>
12. Polishchuk V.I., Kritsky M.V., Bannov D.M., Malyshev S.V. Application of unified microprocessor relay protection units in electrical machine diagnostics. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2019;21(6):93–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100>
13. Neftisov A.V., Sarinova A.Zh., Talipov O.M. Possibility of building microprocessor relay protection devices on open architecture. *Bulletin of Toraigyrov University. Energy Series* 2022;(3):277–292. <https://doi.org/10.48081/IKLZ1109>
14. Zeng Q., Zhang Zh., Xu M., Zhu J. A coordinated relay protection strategy of distribution network based on fault current limiting. *Energy Reports*. 2022;8(3):380–387. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.036>
15. Kholiddinov I.Kh., Misinova G., Yulchiev M.E., Tuychiev Z.Z. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab). *The American Journal of Engineering and Technology*. 2020;2(10):33–37. <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume02Issue10-07>
16. Novobritsky V.A., Fedosov D.S. The main types of wind turbines-generators in the power supply system. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(5):71–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-71-85>
17. Nedelchev N., Matsankov M. Increasing the sensitivity of the digital relay protection against turn-to-turn short circuits and asymmetries in wind power generators. In: *The 3rd International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE 2020)*. 2020;186(4):03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018603001>
18. Romanova V.V., Khromov S.V. Construction of a computer model to study the operating regimes of an asynchronous motor. In: *Collection of scientific papers based on the results of the international scientific-practical conference "Development of Technical Sciences in the Modern World". Vol. II. Voronezh, December 8, 2015. Voronezh: ITsRON Publishing House; 2015. Pp. 35–38. (In Russ.)*
19. Pantel O.V. Asynchronous motor parameters calculation methodology for simulation of its operating regimes in Matlab/Simulink environment. *Academy*. 2015;(2):7–11. (In Russ.)
20. Nemykina V.V., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A. Analysis of current and voltage unbalance in stator windings of asynchronous motors of the auxiliary machine drive. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2020;(4):85–92. (In Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.4\(68\).85-92](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.4(68).85-92)
21. Suvorov I.F., Sidorov A.I., Khromov S.V. Investigation of the effect of unbalanced line voltages in networks up to 1000 V on the modes of induction motors. *Electrical Safety*. 2014;(3):17–30. (In Russ.)

Информация об авторах

Валерия Валерьевна Дмитриева – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической электротехники и электрификации, нефтяной и газовой промышленности, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-8740-9380](https://orcid.org/0000-0002-8740-9380), Scopus ID [56007868500](https://orcid.org/56007868500); e-mail dm-valeriya@yandex.ru

Алдияр Беимбетович Хамматов – магистрант кафедры теоретической электротехники и электрификации, нефтяной и газовой промышленности, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-6286-6845](https://orcid.org/0009-0007-6286-6845); e-mail khammatov.aldik@mail.ru

Information about the authors

Valeria V. Dmitrieva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-8740-9380](https://orcid.org/0000-0002-8740-9380), Scopus ID [56007868500](https://orcid.org/56007868500); e-mail dm-valeriya@yandex.ru

Aldiyar B. Khammatov – Master Student of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0007-6286-6845](https://orcid.org/0009-0007-6286-6845); e-mail khammatov.aldik@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022
Поступила после рецензирования 27.03.2023
Принята к публикации 28.03.2023

Received 25.12.2022
Revised 27.03.2023
Accepted 28.03.2023