

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТИВНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Е. В. Егоров, Д. Д. Боровых

Омский государственный технический университет, г. Омск

Целью статьи является исследование работы оперативно-измерительного комплекса на базе бесконтактных измерителей тока и напряжения для обеспечения мониторинга параметров режимов работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Проведено имитационное моделирование работы электродвигателя и получены расчетные параметры режимов. Экспериментально исследованы различные режимы работы двигателя с использованием лабораторного стенда. Проанализированы полученные оперативно-измерительным комплексом экспериментальные результаты, а также сопоставлены с результатами расчета и эталонными данными. На основании проведенного анализа сделано заключение о корректности работы комплекса в отношении мониторинга параметров электрических режимов.

Ключевые слова: оперативно-измерительный комплекс, бесконтактный датчик, режимы работы, короткое замыкание, электродвигатель, цифровизация, электротехническая система.

Для цитирования: Егоров Е. В., Боровых Д. Д. Применение оперативно-измерительного комплекса для контроля режимов работы асинхронного электродвигателя в электротехнической системе // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 95–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-95-102. EDN: OOFNBU.



© Егоров Е. В., Боровых Д. Д., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPLICATION OF AN OPERATIONAL MEASURING COMPLEX FOR MONITORING THE OPERATING MODE OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITH A CLOSED-LOOP ROTOR

E. V. Egorov, D. D. Borovykh

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

This article examines the operation of an operational measuring complex based on contactless current and voltage meters to monitor the operating parameters of an asynchronous electric motor with a closed-loop rotor. A simulation of the operation of an electric motor has been carried out and the calculated parameters of the mode have been obtained under the conditions of the electrical connection scheme under consideration. Various modes of engine operation are implemented using a laboratory stand during the experiment. The experimental results obtained by the operational measurement complex are analyzed, as well as compared with the calculation results and reference data.

Based on the analysis, a conclusion is made about the correctness of the complex's operation in relation to monitoring the parameters of electrical modes.

Keywords: operational and measuring complex, contactless sensor, operating modes, short circuit, electric motor, digitalization, electrical system.

For citation: Egorov E. V., Borovykh D. D. Application of an operational measuring complex for monitoring the operating mode of an asynchronous electric motor with a closed-loop rotor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 95–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-95-102. EDN: OOFNBU.



© Egorov E. V., Borovykh D. D., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

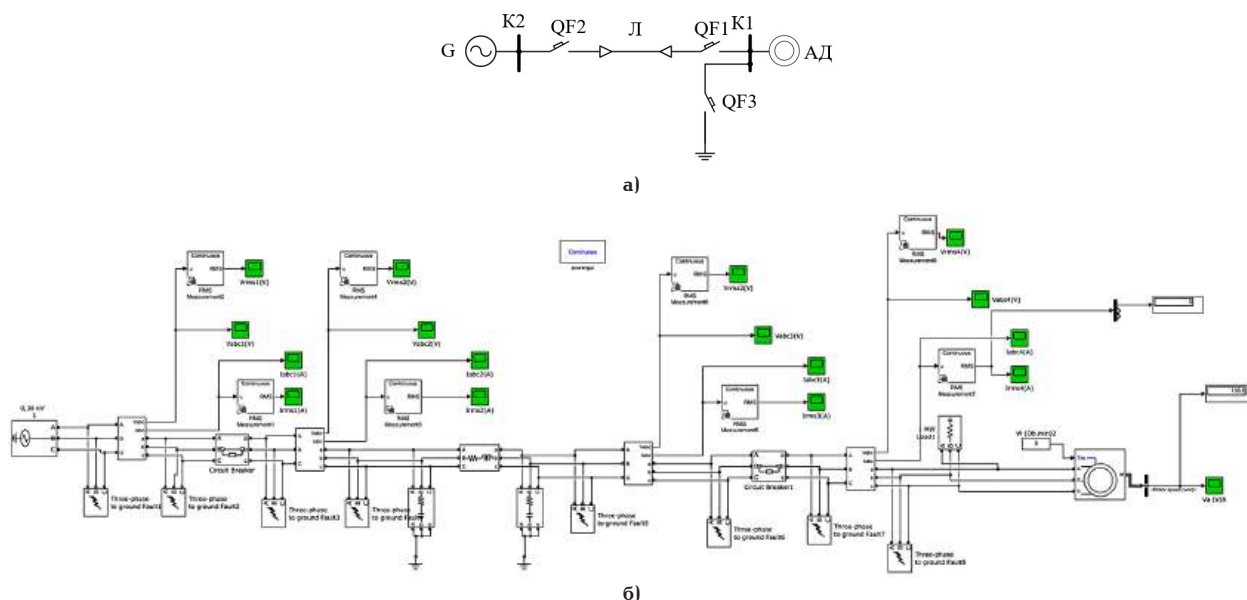


Рис. 1. Схема питания асинхронного двигателя: а — однолинейная схема; б — имитационная модель
Fig. 1. Asynchronous motor power supply circuit: a — single-line circuit; б — simulation model

Введение

За последнее время значительно увеличился уровень внедрения цифровых решений в области электроэнергетики. Всё более актуальной становится задача полной цифровизации устройств релейной защиты и автоматики, а именно переход от использования измерительных трансформаторов тока и напряжения к использованию микропроцессорных (интеллектуальных) измерителей и датчиков. В данной работе рассматривается использование бесконтактных измерителей тока и напряжения в качестве средств мониторинга параметров электроэнергетического режима при реализации оперативно-измерительного комплекса (ОИК) для защиты электродвигателя.

Переход к цифровым устройствам контроля и измерения электрических параметров приобретает всё большую актуальность, что обусловлено внедрением новых решений и технологий: Smart Grid, цифровых подстанций, стандарта МЭК 61850 и т. д.

Этому переходу также способствует уменьшение стоимости подобных измерителей вследствие развития и многообразия элементной базы, упрощения процесса монтажа таких устройств, уменьшения их габаритных показателей.

Подтверждением вышеизложенного могут послужить публикации научного сообщества в рамках данного направления в разных странах. В России среди них можно отметить: предложение о реализации интеллектуальной релейной защиты с использованием набора датчиков физических величин внешних факторов, обзор на тему перехода основных производителей устройств релейной защиты от традиционных измерительных трансформаторов тока и напряжения к цифровым измерителям и датчикам, исследования, посвященные применению катушки Роговского в качестве основного средства измерения для токовых защит [1–3].

За рубежом данная тематика тоже не осталась без внимания. Проводятся исследования в области применения цифровых датчиков в качестве средства реализации повсеместных цифровых электрических сетей, реализации бесконтактных датчиков

тока на основе TMR-матрицы, а также применения бесконтактных датчиков тока для мониторинга, защиты и управления системами электроснабжения [4–6]. Более того, предлагается метод бесконтактного измерения напряжения для нужд электроэнергетики и применение таких измерителей в распределительных сетях [7–8].

Авторами настоящей работы разработан и исследован датчик для бесконтактного измерения напряжения и тока [9]. Указанное устройство сочетает в себе два измерителя. В данной работе рассмотрено применение трехфазного оперативно-измерительного комплекса на основе бесконтактных измерителей напряжения и тока для контроля за режимом работы электродвигателя.

1. Моделирование

Проведено моделирование электроэнергетических режимов согласно представленным на рис. 1 схемам при различных условиях [10].

За основной принят режим работы электродвигателя на холостом ходу.

Источником питания является шина номинальным напряжением 0,4 кВ.

Сопротивлением источника питания в данной модели решено пренебречь.

Линия электропередачи представлена в виде резистивного элемента со сосредоточенными параметрами. Активное сопротивление линии составляет 208 Ом с индуктивностью 0,3 Гн. Приемником электрической энергии, а также и объектом мониторинга, является лабораторный маломощный асинхронный двигатель АИР56А4У2, номинальный ток которого равен 0,443 А.

В рамках исследования произведено моделирование работы двигателя на холостом ходу, а также смоделированы режимы однофазного (K^1), двухфазного (K^2), двухфазного на землю ($K^{1.1}$) и трехфазного коротких замыканий (K^3). Точкой короткого замыкания является $K1$ (рис. 1а). Таким образом, имитируется аварийный режим на зажимах электродвигателя.

Описание моделирования. В начальный момент времени происходит пуск электродвигателя. Пуско-

Таблица 1. Значения токов при различных видах коротких замыканий
Table 1. Current values for various types of short-circuits

Вид КЗ	Действующее значение тока фазы А, А		Действующее значение тока фазы В, А		Действующее значение тока фазы С, А	
	В момент КЗ	В момент УКЗ	В момент КЗ	В момент УКЗ	В момент КЗ	В момент УКЗ
Однофазное КЗ	0,968	0,960	0,134	0,23	0,302	0,294
Двухфазное КЗ	0,81	0,7483	0,953	0,945	0,228	0,368
Двухфазное КЗ на землю	0,965	0,960	1,047	0,960	0,150	0,273
Трёхфазное КЗ	0,968	0,960	1,05	0,960	0,99	0,960

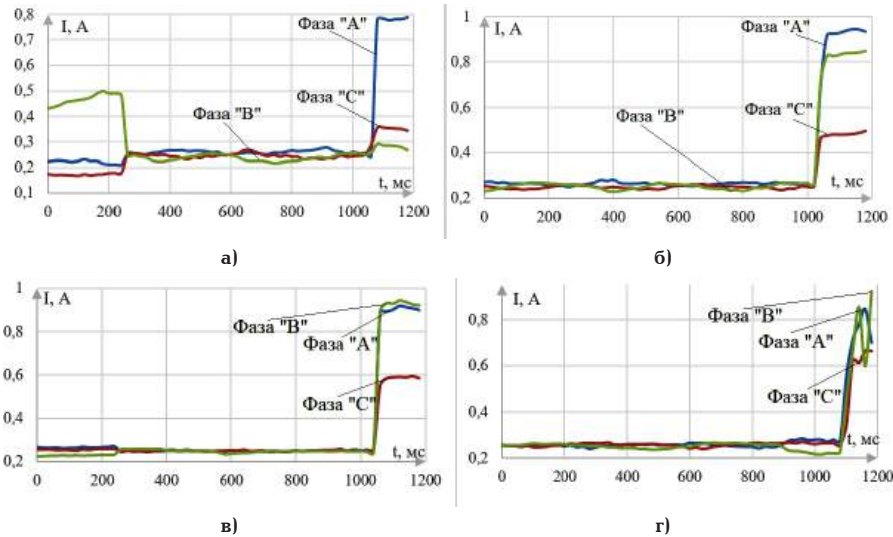


Рис. 2. Осциллограммы действующих значений токов коротких замыканий, измеренных комплексом: а — при однофазном КЗ; б — при двухфазном КЗ;

в — при двухфазном КЗ на землю; г — при трехфазном КЗ

Fig. 2. Waveforms of the effective values of short-circuit currents measured by the complex:

а — for single-phase short-circuit; б — for two-phase short-circuit;

в — for two-phase short-circuit to ground; г — for three-phase short-circuit

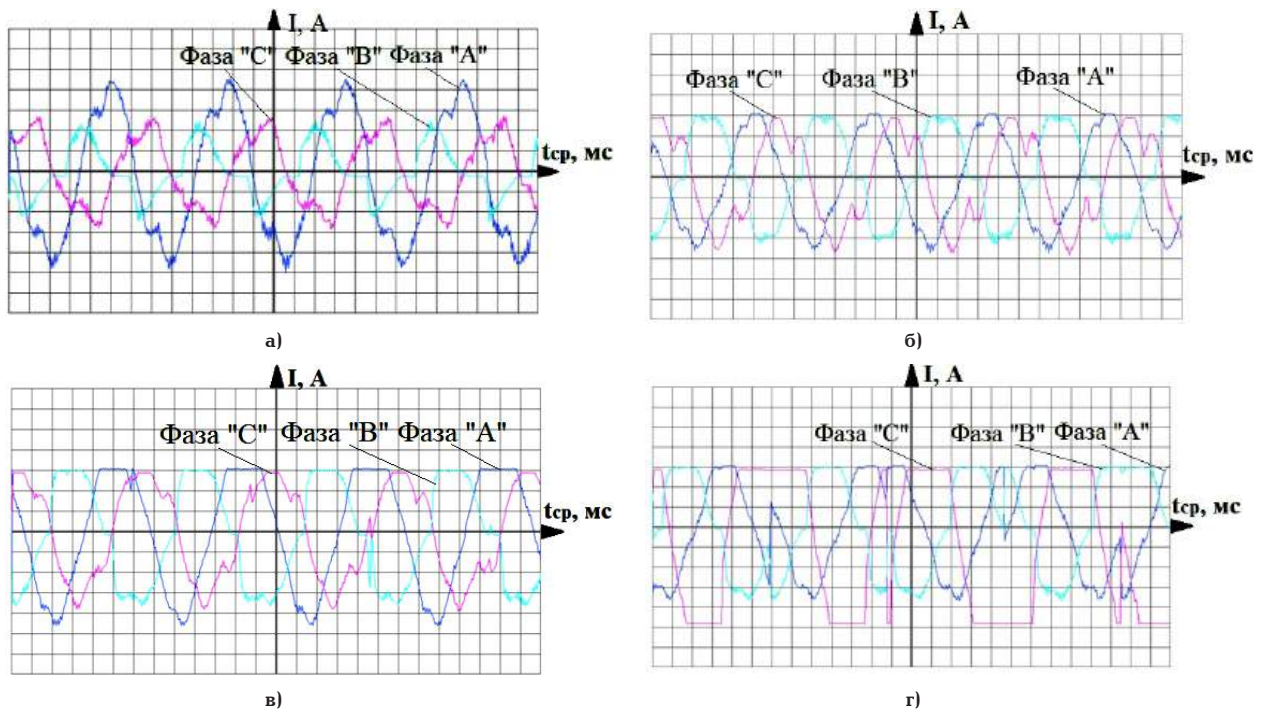


Рис. 3. Осциллограммы мгновенных значений токов УКЗ, измеренных комплексом: а — при однофазном КЗ; б — при двухфазном КЗ; в — при двухфазном КЗ на землю; г — при трехфазном КЗ

Fig. 3. Oscillograms of the instantaneous values of the DC currents measured by the complex:

а — with a single-phase short-circuit; б — with a two-phase short-circuit;

в — with a two-phase short-circuit to ground; г — with a three-phase short-circuit

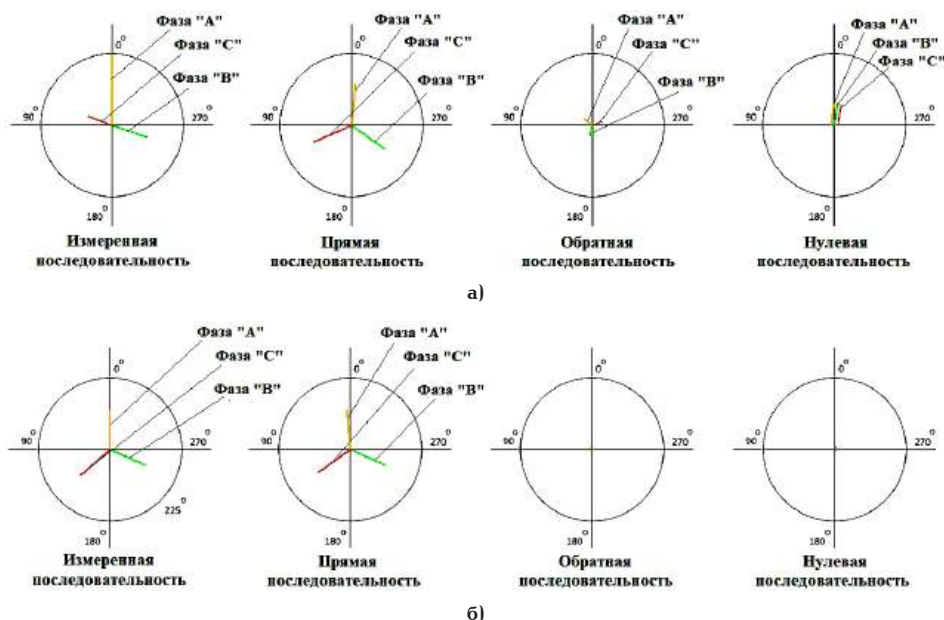


Рис. 4. Векторные диаграммы токов при работе двигателя в различных режимах, полученных комплексом: а — однофазного КЗ; б — холостого хода
Fig. 4. Vector diagrams of currents during engine operation in various modes obtained by the complex: a — single-phase short-circuit; б — idle mode

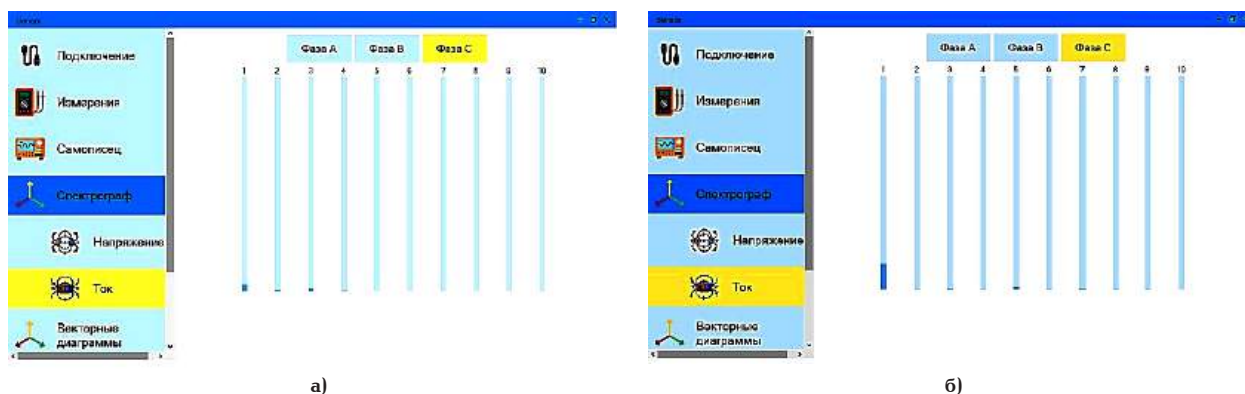


Рис. 5. Спектрограммы токов фазы С при работе АД в режиме двухфазного КЗ на землю, полученных комплексом: а — до возникновения аварийного режима; б — после возникновения аварийного режима
Fig. 5. Spectrograms of phase C currents during operation of BP in the two-phase short-circuit to earth mode, obtained by the complex: а — before the occurrence of the emergency mode; б — after the occurrence of the emergency mode

вой ток двигателя достигает около 0,47 А. В режиме холостого хода машины её ток равен 0,22 А, а фазное напряжение — 191,43 В.

Такое большое падение напряжения объясняется значительным активным и индуктивным сопротивлением линии. Такие параметры схемы выбраны целенаправленно, чтобы избежать больших токов короткого замыкания (КЗ) при реализации эксперимента на стенде. На третьей секунде имитационного процесса моделируется короткое замыкание на зажимах обмоток электродвигателя (точка К1) с помощью выключателя QF3. Значения параметров режимов установившегося короткого замыкания соответствуют моментам времени, когда установившееся КЗ (далее УКЗ) зафиксировано окончательно. Продолжительность короткого замыкания во всех случаях имитаций составляет 1 секунду. На четвертой секунде отключается выключатель QF1.

Данный алгоритм моделирования соответствует всем представленным в работе видам короткого замыкания. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

Полученные при моделировании данные приняты в качестве расчетных значений. Далее данные эксперимента будут сопоставляться с расчетными и эталонными.

II. Экспериментальная часть

Как было сказано ранее, рассматривается режим работы электродвигателя на холостом ходу, а также его аварийные режимы.

Описание эксперимента. Схема электрических соединений при осуществлении эксперимента соответствует приведенной выше (рис. 1а). В режиме холостого хода значение фазного напряжения, измеренного лабораторным мультиметром в точке К2, изменяется в диапазоне 186—189 В.

Линия электропередачи реализована в виде блока резистивно-индуктивных элементов. С помощью автоматического выключателя QF3 осуществляются короткие замыкания. Бесконтактные измерители тока и напряжения в количестве трех экземпляров по одному на каждую фазу расположены в точке К2. При этом замыкания производятся в точке К1. Из-за достаточно высокого сопротивления линии

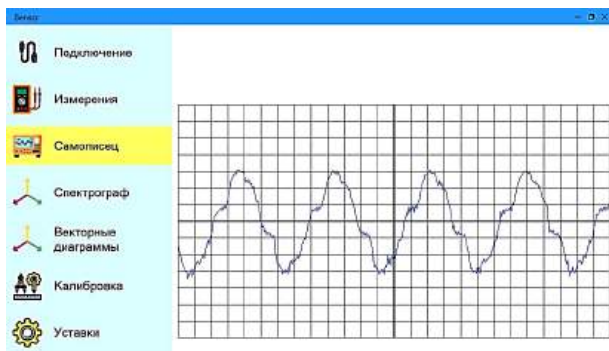


Рис. 6. Осциллограмма тока фазы С при работе АД в режиме холостого хода (масштаб тока $m_i = 0,11$ А/кА)
Fig. 6. Oscilloscope of the phase C current when the BP is operating in idle mode (current scale $m_i = 0.11$ A/k)

ток КЗ не превышал 1,7 А во всех производимых экспериментах. Значения, полученные с помощью лабораторных мультиметров, приняты в качестве эталонных.

Для повышения достоверности получаемых данных каждый вид короткого замыкания производится несколько раз. Полученные при экспериментах осциллограммы приведены на рис. 2.

Форма кривой, полученная при измерении мгновенных значений токов в режиме УКЗ с помощью ОИК, представлена на рис. 3.

Также комплекс имеет возможность записи векторных диаграмм (рис. 4) и фиксации гармонических составляющих тока и напряжения каждой фазы (рис. 5). Возможность визуализации векторных диаграмм (ВД) и амплитуды гармонических составляющих реализована непосредственно в программном обеспечении данного ОИК.

Осциллограмма мгновенных значений тока в фазе С приведена на рис. 6.

III. Анализ результата

При сопоставлении результатов используется три источника данных. Данные результаты сведены в таблицу сопоставления (табл. 2).

Первый источник — полученные расчетные значения при реализации имитационного моделирования; второй — полученные оперативно-измеритель-

ным комплексом величины; третий — измеренные эталонные значения с помощью лабораторных мультиметров (эталон).

Проведем общую оценку полученных результатов.

Оценка режима при работе асинхронного двигателя (АД) на холостом ходу (нормальный режим): режим холостого хода в работе принят за нормальный с целью безопасного проведения экспериментов. На основании приведенной осциллограммы холостого хода (рис. 6) видно, что форма кривой тока фазы С близка к синусоидальной, однако всё же не является чистой синусоидой. Данное обстоятельство, безусловно, является результатом погрешности применяемых измерителей, а также результатом действительного искажения кривой синусоиды из-за воздействия подключенных нелинейных нагрузок к электрической сети на момент проведения эксперимента. Нелинейность можно также обнаружить с помощью реализованной в комплексе функции фиксации и отображения гармонических составляющих тока и напряжения. Как видно, в режиме холостого хода (рис. 5а) форма кривой тока фазы С содержит гармонические составляющие с 1-й по 4-ю. Преимущественно проявляются нечетные гармонические составляющие.

Говоря о форме кривой, полученной комплексом, можно сказать, что в целом она удовлетворяет задачи мониторинга состояния работы электродвигателя.

Значение расчетного напряжения в данном режиме составляет 191,43 В, значение эталонного источника измерения изменяется в диапазоне от 186 до 189 В. Измеренное комплексом напряжение варьируется также в данном диапазоне. Расчетный ток в режиме холостого хода равен 0,22 А, при колебаниях показателей эталонного измерителя тока 0,24–0,25 А и показателей ОИК 0,22–0,27 А.

Соответственно, на основании полученных результатов, представленных комплексом, можно сделать однозначное заключение о нормальности данного режима, поскольку представленная информация явно демонстрирует симметричность режима, при этом значения параметров лежат в допустимых пределах. На основании таблицы сопоставления (табл. 2) также видно, что измеренные комплексом значения токов при холостом ходе до-

Таблица 2. Значения расчетных, измеренных и эталонных токов
Table 2. Current values of calculated, measured and reference currents

Вид КЗ	Тип измерения	I_A , А			I_B , А			I_C , А		
		ХХ	КЗ	УКЗ	ХХ	КЗ	УКЗ	ХХ	КЗ	УКЗ
К ⁽¹⁾	Расчетное	0,22	0,99	0,96	0,22	0,13	0,23	0,22	0,30	0,29
	ОИК	0,24	0,78	0,78	0,26	0,29	0,29	0,29	0,36	0,35
	Эталон	0,24	0,97	0,96	0,24	0,3	0,25	0,25	0,26	0,25
К ⁽²⁾	Расчетное	0,22	0,82	0,75	0,22	0,95	0,95	0,22	0,23	0,37
	ОИК	0,25	0,92	0,94	0,26	0,83	0,84	0,26	0,47	0,48
	Эталон	0,25	0,92	0,94	0,25	0,83	0,85	0,24	0,47	0,49
К ^(1,1)	Расчетное	0,22	0,97	0,96	0,22	1,05	0,96	0,22	0,25	0,27
	ОИК	0,26	0,92	0,91	0,24	0,94	0,94	0,26	0,59	0,59
	Эталон	0,25	0,98	0,9	0,24	0,96	0,95	0,24	0,37	0,4
К ⁽³⁾	Расчетное	0,22	0,97	0,96	0,22	1,05	0,96	0,22	0,99	0,96
	ОИК	0,27	0,78	0,70	0,23	0,86	0,92	0,26	0,61	0,67
	Эталон	0,25	0,97	0,96	0,25	1,06	0,96	0,25	1,04	0,96

статочны близки к эталонным значениям тока. Их разница относительно расчетного значения тока холостого хода объясняется несовершенством модели и неидеальными условиями эксперимента. То есть в целом комплекс обеспечивает достаточную информативность для анализа и отслеживания режима при работе приемника в нормальном состоянии.

Оценка режима однофазного КЗ. При анализе полученных измерений, отраженных на рис. 2а, видно, что на интервале времени от 0 до 260 мс наблюдается некий бросок тока. Максимальное и минимальное значения напряжения на данном интервале времени составляют 235 В и 144 В, а тока — 0,500 А (ток IC) и 0,165 А (ток IB) соответственно. При этом работа двигателя продолжалась в режиме холостого хода. Данный эффект можно объяснить погрешностью измерительных устройств вследствие воздействия на них напряжения и токов соседних фаз, то есть избыточной чувствительностью измерителей. После 260 мс значения измеренных токов и напряжений возвращаются к значениям около 0,25 А и 185 В, что с определенной долей погрешности соответствует расчетным и эталонным значениям для холостого хода данного режима. В момент 1060 мс возникает аварийное событие.

На основании представленной осциллограммы действующих значений тока однозначно видно, что замыкание произошло в фазе А, поскольку ток в ней возрос в разы по сравнению с предыдущими значениями, а также по сравнению с текущими значениями токов в соседних фазах. Стоит отметить, что ток в неповрежденных фазах также увеличивается по сравнению с режимом холостого хода. На 1120 мс происходит окончательное затухание переходного аварийного процесса и наступает режим установившегося короткого замыкания. Однако обнаружить возникшее аварийное событие на основании осциллограммы действующих значений напряжений не представляется возможным, поскольку датчик, сочетающий в себе источник измерения напряжения и тока в одном устройстве, находится на удаленном расстоянии относительно точки КЗ.

Анализ векторных диаграмм короткого замыкания (рис. 4а) показывает, что ток в аварийной фазе превышает токи в неповрежденных фазах. Токи фаз В и С находятся в противофазе, поскольку в результате возникновения аварийного режима, работа двигателя сохраняется на оставшихся двух фазах. Вследствие этого возникает ток обратной и нулевой последовательностей, что провоцирует повышенный нагрев обмоток электродвигателя. Причем ток нулевой последовательности превышает значение тока обратной последовательности (рис. 4а).

Оценка режима двухфазного КЗ. Анализируя осциллограммы действующих значений токов и напряжений (рис. 2б), можно сделать однозначный вывод о состоянии режима на определенный момент времени. Так, например, видно, что на осциллограмме для режима двухфазного КЗ (рис. 2б) имеет место несколько различных состояний. В период с начала записи по 1020 мс двигатель работает в режиме холостого хода с током около 0,24–0,27 А и с напряжением 170–192 В действующих значений. В момент времени 1020 мс происходит аварийный режим в фазах А и В. Начинается переходный процесс с продолжительностью до 1080 мс. Более детально рассмотреть действующие значения при переходном процессе не представляется воз-

можным, поскольку память комплекса на текущий момент позволяет накопить информацию за 60 последних периодов с момента записи. Таким образом, так как в одном периоде 20 мс (при частоте 50 Гц), соответственно, расстояние между двумя соседними точками измерения достаточно велико. При необходимости режим переходного процесса можно рассмотреть подробнее с помощью мгновенных значений. Комплекс позволяет записать 88 точек измерения в одном периоде, таким образом, между двумя точками промежуток во времени составит 0,227 мс.

Оценка режима двухфазного КЗ на землю. Осциллограмма действующих значений токов (рис. 2в) показывает, что в отношении этих значений режим в целом аналогичен двухфазному КЗ. Однако можно заметить, что токи в режиме двухфазного КЗ на землю несколько превосходят значения в режиме двухфазного КЗ как в отношении поврежденных, так и в отношении неповрежденных фаз. Разумеется, токи в этих режимах превосходят токи однофазного КЗ при тех условиях, в которых проводились эксперименты.

Осциллограммы мгновенных значений тока (рис. 3в) говорят о наличии насыщения в измерительных элементах. Обусловлено это насыщением операционного усилителя, являющегося одной из основных составляющих схемы измерителя.

Из анализа спектрограмм (рис. 5) видно, что по сравнению с режимом холостого хода прослеживается уменьшение амплитуды третьей гармонической составляющей и увеличение пятой и седьмой составляющих. Характерно, что изменяются именно нечетные гармонические составляющие.

При сопоставлении результатов, измеренных комплексом и результатов эталонного источника данных, а также расчетных значений видно, что по сравнению с режимом двухфазного КЗ погрешность относительно эталонного значения возросла.

Оценка трехфазного КЗ. Осциллограмма показывает (рис. 2г), что ток трехфазного КЗ превосходит токи остальных коротких замыканий. То есть данное возмущение является наиболее тяжелым в отношении работы электродвигателя. Осциллограмма мгновенных значений (рис. 3г) также показывает, что измерительные устройства входят в насыщение по току. Причем в режиме трехфазного КЗ это явление более явное относительно двухфазного КЗ на землю.

Результат измерений комплекса в данном режиме заметно отличается от эталонных и расчетных значений. Это обусловлено эффектом насыщения, описанным и зафиксированным выше, из-за которого растёт погрешность измерения тока.

Заключение

На основании изложенного, однозначно можно сделать вывод, что данный измерительный комплекс достаточно достоверно дает представление о характере рассматриваемого на текущий момент режима. Комплекс имеет широкие функциональные возможности измерений: измерение фазных и линейных токов и напряжений; действующих и амплитудных токов и напряжений; максимального мгновенного значения тока и напряжения за измеряемый период; значений передаваемых активной, реактивной и полной мощностей; коэффициента мощности и др.

Бесконтактные измерения также позволяют обеспечить гальваническую развязку измеритель-

ных цепей относительно силовых. Указанное достоинство является серьезным аргументом в пользу повсеместного внедрения подобного рода комплексов. Данное решение может значительно увеличить уровень наблюдаемости режима в электроэнергетической системе [11]. Преобразование информации в цифровую форму на уровне датчиков позволяет совместить работу комплекса с другими цифровыми устройствами [12].

Тем не менее устройство требует определенной доработки и совершенствования: велика погрешность измерений, особенно при резких бросках тока; нехватка памяти головного узла комплекса. Однако эти недостатки не являются непреодолимыми.

Таким образом, предлагаемый оперативно-измерительный комплекс уже сейчас позволяет реализовать мониторинг электрических режимов для обеспечения надежной работы электротехнической системы. На его базе возможно реализовать различные устройства защиты, автоматики, управления и т. д. Разработанный прототип требует совершенствования и доработки. Необходимо уменьшать степень погрешности измерений. Осуществить это возможно посредством экранирования отдельных составляющих измерительного комплекса, реализацией изменения коэффициента усиления в режиме реального времени, а также применением более совершенных методов фильтрации с помощью программной и аппаратной обработки полученной физической величины.

Благодарности / Acknowledgments

Авторы выражают глубокую признательность научному руководителю Федянину Виктору Викторовичу, кандидату технических наук, доценту, за полезные замечания и советы, которые помогли в работе над статьей.

The authors express deep gratitude to the scientific supervisor Fedyanin Viktor Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, for useful comments and advice that have assisted at the work on the article.

Список источников / References

1. Дикарев П. В., Шилин А. А. Интеллектуальная релейная защита // Вестник молодёжной науки России. 2019. № 2. С. 26. EDN: MDLLKQ.
2. Dikarev P. V., Shilin A. A. Intellekturnaya reley'naya zashchita [Intelligent relay protection]. Vestnik molodezhnoy nauki Rossii. *Journal of Youth Science*. 2019. No. 2. P. 26. EDN: MDLLKQ. (In Russ.).
3. Новокрещенов В. В., Иванова В. Р. Обзор современных устройств релейной защиты и автоматики и измерительных преобразователей, используемых при модернизации электротехнических комплексов и систем // Тинчуринские чтения: материалы XIV Междунар. молодеж. науч. конф. В 3 т. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. Т. 1, ч. 2. С. 81–85. EDN: YXWZOJ.
4. Novokreshchenov V. V., Ivanova V. R. Obzor sovremennykh ustroystv reley'noy zashchity i avtomatiki i izmeritel'nykh preobrazovateley, ispol'zuyemykh pri modernizatsii elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem [An overview of modern relay protection and automation devices and measuring transducers used for the modernization of electrical complexes and systems]. Tinchurinskiye chteniya. *Tinchurin Readings*. In 3 vols. Kazan, 2019. Vol. 1, part 2. P. 81–85. EDN: YXWZOJ. (In Russ.).
5. Фесенко М. Е., Скорик В. Г. Катушка Rogovskogo как альтернативный измерительный орган в релейной защите // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XX веке: тр. всерос. науч.-практ. конф. В 2 т. 2021. Т. 2. С. 63–67. EDN: IHEXLI.
6. Fesenko M. E., Skorik V. G. Katushka rogovskogo kak al'ternativnyy izmeritel'nyy organ v reley'noy zashchite [Rogovsky coil, as an alternative measuring organ in relay protection]. *Nauchno-tehnicheskoye i Ekonomicheskoye Sotrudnichestvo Stran ATR v XX veke*. In 2 vols. 2021. Vol. 2. P. 63–67. EDN: IHEXLI. (In Russ.).
7. Peng Li, Youping Fan, Zhong Liu [et al.]. Application status and development trend of intelligent sensor technology in the electric power industry. *IET Science, Measurement and Technology*. 2024. No. 18 (4). P. 145–162. DOI: 10.1049/smt2.12175.
8. Peng Li, Bing Tian, Licheng Li [et al.]. A contactless current sensor based on TMR chips. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. No. 71. P. 1–11. DOI: 10.1109/TIM.2022.3191663.
9. Prasad Shrawane, Tarlochan Sidhu. Magnetic sensors for contactless and non-intrusive measurement of current in AC power systems. *The Journal of Engineering*. 2024. No. 6. P. 1–15. DOI: 10.1049/tje2.12371.
10. Xiangyu Tan, Wenbin Zhang, Mingxing He [et al.]. Non-contact adaptive voltage sensor based on electric field coupling principle. *Sensors*. 2023. No. 23 (19). 8316. P. 1–22. DOI: 10.3390/s23198316.
11. Qiang Zhou, Wei He, Dongping Xiao [et al.]. Study and experiment on non-contact voltage sensor suitable for three-phase transmission line. *Sensors*. 2015. No. 16 (1). P. 1–21. DOI: 10.3390/s16010040.
12. Боровых Д. Д., Егоров Е. В. Разработка и исследование устройства для бесконтактного измерения напряжения и тока // Ученые Омска — региону: материалы VIII Регион. науч.-техн. конф. / под общей ред. Л. О. Штриплинга. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2023. С. 11–18. EDN: BLEJGF.
13. Borovykh D. D., Egorov E. V. Razrabotka i issledovaniye ustroystva dlya beskontaktnogo izmereniya napryazheniya i toka [Development and research of a device for contactless voltage and current measurement]. *Uchenyye Omska — Regionu* / ed. by L. O. Shtripling. Omsk, 2023. P. 11–18. EDN: BLEJGF. (In Russ.).
14. Dawood A., Hasaneen B. M., Abdel-Aziz A. M. Design of an efficient neural network model for detection and classification of phase loss faults for three-phase induction motor. *Neural Computing and Applications*. 2024. No. 36 (11). P. 1–19. DOI: 10.1007/s00521-023-09387-y.
15. Chaolan Shen, Xiaohu Liu, Ke Jin [et al.]. Research on noncontact voltage measurement method for three-phase busbar of low-voltage distribution cabinets. *Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024. No. 73. P. 1–13. DOI: 10.1109/TIM.2024.3364266.
16. Bagherian A., Gershon M., Kumar S. [et al.]. Analyzing the relationship between digitalization and energy sustainability: A comprehensive ISM-MICMAC and DEMATEL approach. *Expert Systems with Applications*. 2024. No. 236 (4). DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121193.
17. ЕГОРОВ Егор Викторович, ассистент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск. SPIN-код: 7947-4125
AuthorID (РИНЦ): 1204758
Адрес для переписки: Egorov10.2000@mail.ru
18. БОРОВЫХ Даниил Дмитриевич, ассистент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 5931-2462
AuthorID (РИНЦ): 1168506
Адрес для переписки: themrfelix03050124@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 07.07.2025.

EGOROV Egor Viktorovich, Assistant of the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 7947-4125
AuthorID (RSCI): 1204758

Correspondence address: Egorov10.2000@mail.ru
BOROVYKH Daniil Dmitrievich, Assistant of the Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 5931-2462
AuthorID (RSCI): 1168506
Correspondence address: themrfelix03050124@gmail.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 14.05.2025; accepted for publication 07.07.2025.