ОПЫТ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НА УЧЕБНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЭЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ BINOM3

О.А. ВАСИЛЬЕВА, М.А. ШАХОВА (ЗАО “Алгоритм”),
В.В. СИМОНОВ, А.А. КОКУЛИН, Е.М. ФРЕЙЦИС (ФГАОУ ВО “СПбПУ”)

В статье представлено описание учебного стенда, организованного на базе действующего электрооборудования ТЭЦ Национального исследовательского университета “МЭИ” и многофункциональных измерительных приборов BINOM3, позволяющих проводить инструментальные исследования режимов работы оборудования в дистанционном формате. В качестве примера произведена оценка качества электрической энергии на секции 0,4 кВ собственных нужд ТЭЦ в нормальном режиме, подтвердившая соответствие нормируемых ПКЭ требованиям ГОСТ 32144-2013, и при возмущениях, обусловленных включением двигательной нагрузки и внешними короткими замыканиями в энергосистеме. Приведенное в публикации техническое решение демонстрирует возможности и эффективность применения цифровых технологий, реализованных в приборах BINOM3, при практическом воплощении концепции цифровой трансформации в электроэнергетике и образовательной деятельности.

Ключевые слова: *трансформатор собственных нужд; провалы напряжения; BINOM3; цифровая трансформация; качество электроэнергии; электродвигатель; короткое замыкание.*

Во взаимодействии между ФГАОУ “НИУ МЭИ”, имеющим в своем административно-хозяйственном и оперативном управлении учебно-экспериментальную теплоэлектроцентраль, ФГАОУ ВО “СПбПУ” и ЗАО “Алгоритм” организован учебный стенд, позволяющий в режиме реального времени проводить инструментальные исследования в дистанционном формате режимов работы действующего электрооборудования ТЭЦ.

Стенд выполнен с использованием интеллектуальных приборов учета электрической энергии BINOM3 [1], измеряющих с высокой точностью и разрешающей способностью на каждом присоединении (в цепях турбогенератора и трансформатора собственных нужд) более 2000 электрических величин, их оперативную цифровую обработку и статистический анализ по разным вычислительным алгоритмам, обеспечивая большой массив данных совершенно нового качества, доступных ранее только на специальных исследовательских стендах, формирование из них готовых к использованию выходных форм, макетов, отчетов, осциллограмм (суть технологии Big Data, Data set). К встроенным в приборы WEB-серверам открыт on-line доступ, что позволяет, используя мобильные технологии и сеть Интернет, предоставлять доступ к их данным российским и зарубежным профильным ВУЗам, центрам повышения квалификации оперативного и эксплуатационного персонала энергосистем, предприятиям электроэнергетики.

Стенд позволяет осуществлять разбор аварийных ситуаций на действующей ТЭЦ в режиме реального времени и использовать результаты в образовательной деятельности, осваивать цифровые технологии для анализа режимов работы электрооборудования. Например, в публикациях [2, 3] дана оценка показателей качества электроэнергии и эффективности действия систем управления возбуждением и мощностью турбогенератора ТЭЦ в нестационарных режимах его работы: в режиме внешнего двухфазного короткого замыкания и при выделении на автономную работу (изолированно от энергосистемы).

В данной статье рассматривается методика определения статистических характеристик качества электрической энергии и производится оценка качества электроэнергии на

Рис. 1. Схема стенда на базе турбогенератора Т-6-2У3, ТСН 6,3/0,4 кВ и цифровых приборов BINOM337

стороне 0,4 кВ ТСН (на секции собственных нужд) в нормальном режиме и при возмущениях, обусловленных включением двигательной нагрузки и внешними короткими замыканиями в энергосистеме.

ОПИСАНИЕ СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ И СХЕМЫ СТЕНДА

Схема стенда (рис. 1) включает турбогенератор типа Т-6-2ЕУ3, выдающий мощность на генераторное распределительное устройство (ГРУ) напряжением 6,3 кВ, от которого осуществляется электроснабжение собственных нужд станции через ТСН напряжением 6,3/0,4 кВ. Через повышающий трансформатор Т на шины напряжением 10 кВ распределительного пункта РП-10114 осуществляется выдача мощности местному потребителю. Связь с энергосистемой выполняется с помощью кабельных линий, по которым выдается избыточная электроэнергия и производится резервирование электроснабжения местного потребителя.

С помощью многофункциональных цифровых приборов BINOM3 (ЗАО “Алгоритм”, г. Санкт-Петербург) осуществляются непрерывные измерения и контроль режимных параметров и показателей качества электроэнергии в цепи 6,3 кВ статора турбогенератора и мониторинг ТСН со стороны 0,4 кВ. Сведения о типах приборов, адреса и параметры on-line авторизации приведены в табл. 1. Для доступа к приборам необходим персональный компьютер с установленным интернет-браузером “GoogleChrome” не ниже 43-ей версии, и рекомендуется скорость доступа в интернет не менее 1 Мбит/с.

Алгоритмы измерений и статистической обработки показателей качества электроэнергии в BINOM3 реализованы в полном соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.7-2103 (IEC 61000-4-7:2009) по классу точности I, ГОСТ 30804.4.30-2103 (IEC 61000-4-30:2008) по классу А, ГОСТ 32144-2013, ГОСТ 33073. Приборы внесены в Государственный реестр СИ под № 60113-15 (свидетельство об утверждении типа СИ ОС.С.34.001.А № 58154/2, *https://portal-energy.ru/binom3*).

Таблица 1. Сведения об измерительных приборахBINOM3 и данные авторизации

Присоединение	Тип прибора	Адрес	Логин/ пароль для доступа
Цепь генератора Т-6-2У3	BINOM337U3.57I3.5S16T2 (57,7 В, 5А)	*http://hpc-ec2.mpei.ru*	user/1
Цепь ТСН 0,4 кВ	BINOM337U3.220I3.5S16T2 (220 В, 5А)	*http://hpc-ec1.mpei.ru*	

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

ГОСТ 32144-2013 устанавливает нормы качества электрической энергии по напряжению (таблица 2) для 131-го параметра. К ним относятся: отклонение частоты Δf; положительное $+\delta U$ и отрицательное $-\delta U$ отклонения напряжения для каждой фазы; коэффициенты несимметрии напряжения по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательностям; коэффициенты n-ых гармоник $K_{U(n)}$ напряжения до 40-го порядка и суммарные коэффициенты гармоник напряжения K_U для каждой фазы; кратковременная P_{st} и длительная P_{lt} дозы фликера.

Измерение каждого ПКЭ, за исключением кратковременной и длительной доз фликера, осуществляется на основном интервале времени, в качестве которого по ГОСТ 30804.4.30-2013 принят интервал длительностью 10 периодов основной частоты (200 мс для 50 Гц). Затем результаты измерений объединяют (усредняют) для получения значений ПКЭ на увеличенном интервале времени по формуле:

$$\text{ПКЭ}_{\text{у}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \text{ПКЭ}_i^2}{N}},$$

где: ПКЭ_i – значение на основном i-ом интервале времени; $\text{ПКЭ}_{\text{у}}$ – значение на интервале усреднения (применяется интервал усреднения, равный 10-ти минутам, кроме длительной дозы фликера (2 часа) и отклонения частоты (10 с)); N – количество значений, измеренных на основных интервалах времени в течение интервала усреднения ($N = 3000$ для интервала усреднения 10 мин, $N = 50$ для интервала 10 с).

Измерения ПКЭ производятся непрерывно в течение периода наблюдений, который согласно ГОСТ 32144-2013 составляет одну неделю (168 ч), а по ГОСТ 33073-2014 может быть равен одним суткам (24 ч). При этом число 10-минутных ПКЭ за неделю измерений составляет 1008, а за сутки – 144. Для оценки соответствия ПКЭ установленным нормам производится статистическая обработка полученного массива значений. Значения каждого ПКЭ за период наблюдения упорядочиваются по возрастанию на числовой оси (от наименьшего до наибольшего) и определяются статистические характеристики, которые сравниваются с нормативными значениями:

- наибольшее значение (граница, ниже которой находятся 100 % измеренных значений ПКЭ);
- верхнее значение (граница, ниже которой находятся 95 % измеренных значений ПКЭ);
- относительное время превышения нормально допускаемых значений T_1:
  $T_1 = \frac{M_1}{M_\Sigma} \cdot 100\%$;
- относительное время превышения предельно допускаемых значений T_2:
  $T_2 = \frac{T_2}{M_\Sigma} \cdot 100\%$,
  где: M_1 – число результатов измерений, вышедших за диапазон нормально допускаемых значений; M_2 – число результатов измерений, вышедших за диапазон предельно допускаемых значений; M_Σ – общее число результатов измерений в 100 % времени периода наблюдений.

Нормально и предельно допускаемые значения ПКЭ регламентируются ГОСТ 32144-2013 (таблица 2), а для T_1 и T_2 установлены следующие граничные значения: $T_1 \le 5\%$, $T_2 = 0\%$.

Таблица 2. Нормируемые показатели качества электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013

№	Название ПКЭ	Формула вычисления ПКЭ	Интервал усреднения	Нормативные значения		Количество ПКЭ
				95 % времени	100 % времени	
1	Отклонение частоты, Гц	$\Delta f = f_{10} - f_{\text{ном}}$	10 с	0,2	0,4	1
2	Положительное отклонение фазного напряжения, %	$+\delta U = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} U_i^2} - U_{\text{согл (ном)}}}{U_{\text{согл (ном)}}} \cdot 10$ U_i – значение, большее или равное $U_{\text{согл(ном)}}$	10 мин	–	10	3
3	Отрицательное отклонение фазного напряжения, %	$-\delta U = \frac{U_{\text{согл (ном)}} - \sqrt{\sum_{i=1}^{N} U_i^2}}{U_{\text{согл (ном)}}} \cdot 100$, U_i – значение, меньшее или равное $U_{\text{согл(ном)}}$	10 мин	–	10	3

Продолжение таблицы 2. Нормируемые показатели качества электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013

№	Название ПКЭ	Формула вычисления ПКЭ	Интервал усреднения	Нормативные значения		Количество ПКЭ
				95 % времени	100 % времени	
4	Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, %	$K_{2U}=\frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}}\cdot 100$	10 мин	2	4	1
5	Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности, %	$K_{0U}=\frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}}\cdot 100$	10 мин	2	4	1
6	Коэффициент гармонической составляющей напряжения порядка (n), n = 1…40, %	$K_{U(n)}=\frac{U_{(n)}}{U_{1(1)}}\cdot 100$	10 мин	ГОСТ 32144	в 1,5 раза больше ГОСТ 32144	117
7	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения U, %	$K_U=\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40}U_{(n)}^2}}{U_{1(1)}}\cdot 100$	10 мин	ГОСТ 32144	ГОСТ 32144	3
8	Кратковременная доза фликера, о.е.	P_{st}	10 мин	–	1,38	1
9	Длительная доза фликера, о.е.	$P_{lt}=\sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{N}P_{st\,i}^3}{N}}$	2 ч	–	1	1
					Всего:	**131**

В качестве примера статистической обработки ПКЭ, реализованной в приборах BINOM3, проведем оценку соответствия нормам коэффициента 35-ой гармоники фазного напряжения $K_{U(35)}$ (фаза B), измеренного на секции сборных шин 6,3 кВ ГРУ. На рис. 2 и рис. 3 показаны графики изменения 144-х 10-минутных значений в течение суток: по оси времени (рис. 2) и по числовой оси в порядке возрастания (рис. 3). Согласно графикам верхнее значение $K_{U(35)\text{в.}(95\,\%)}=1{,}068\,\%$, наибольшее значение $K_{U(35)\text{нб.}}=1{,}078\,\%$, относительное время превышения нормально допускаемого значения (1 %) $T_1=\frac{98}{144}\cdot 100\,\%=68{,}056\,\%$ и предельно допускаемого значения (1,5 %) $T_2=$ $=\frac{0}{144}\cdot 100\,\%=0\,\%$.

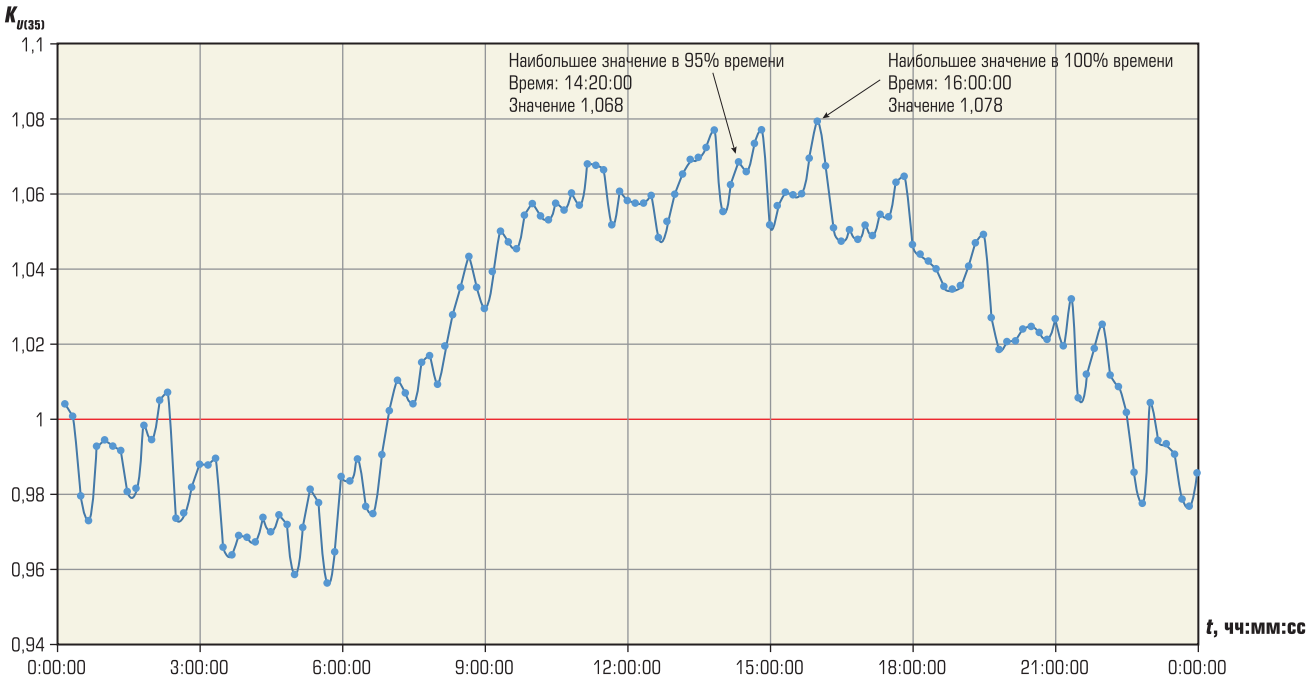

Рис 2. Изменение на шинах ГРУ 6,3 кВ вдоль оси времени (период наблюдений – 1 сутки, интервал усреднения – 10 мин, 144 значения)

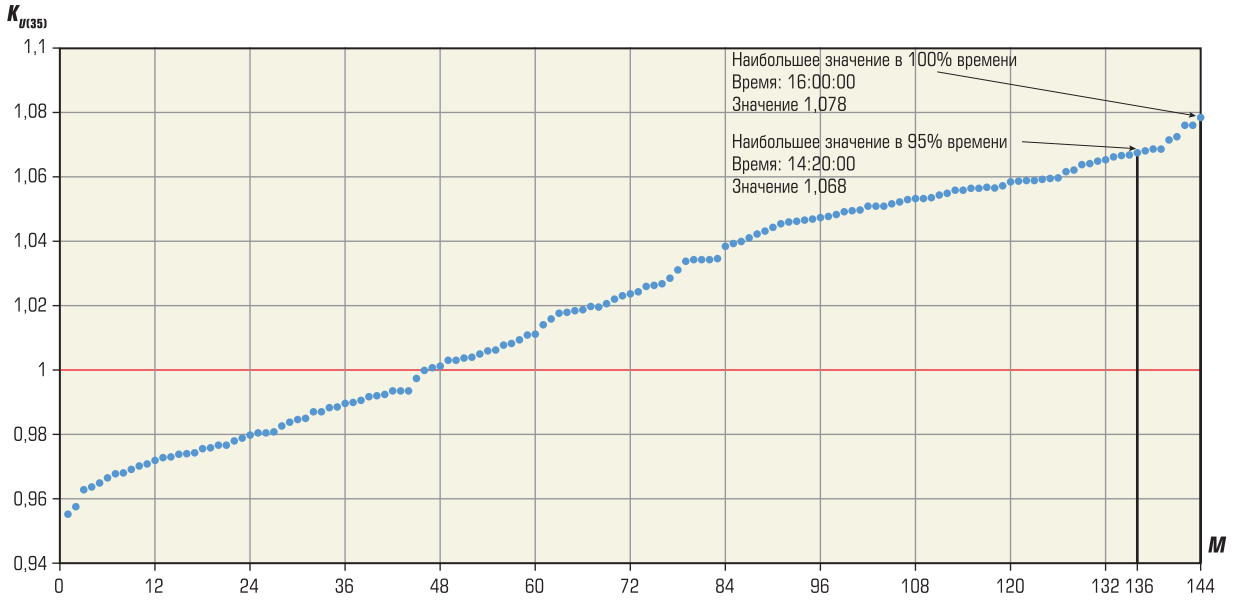

Рис. 3. Изменение на шинах ГРУ 6,3 кВ вдоль числовой оси по возрастанию значения (период наблюдений – 1 сутки, интервал усреднения – 10 мин, 144 значения)

Полученные статистические характеристики отражаются в протоколе испытаний электрической энергии и экранных формах встроенного в BINOM3 программного обеспечения. На рис. 4 приведена экранная форма с результатами цифровой статистической обработки коэффициентов гармоник фазного напряжения со 2-го до 50-го порядка. Выделенный фрагмент на рисунке показывает, что на секциях 6,3 кВ ГРУ превышено нормально допускаемое значение коэффициента 35-ой гармоники напряжения в фазе В в 68,056 % времени наблюдения, верхнее значение коэффициента для 95 % интервала времени наблюдений $K_{U(35)95\,\%}$ = 1,068 % при нормативном нормально допускаемом значении $K_{U(35)\text{н.д.}}$. Долевое содержание остальных гармоник в фазном напряжении находится в переделах установленных норм.

Аналогичным образом производится цифровая обработка массивов значений всех нормируемых ПКЭ.

Результаты анализа показателей качества электрической энергии на секции шин собственных нужд 0,4 кВ, выполненного прибором на интервале времени с 1 сентября 2020 года по 31 марта 2021 года свидетельствуют, что качество электроэнергии во всех периодах наблюдений по всем нормируемым ПКЭ полностью соответствует ГОСТ 32144-2013 (рис. 5, рис. 6).

n	$K_{U(n)в(95\%)}$	$K_{U(n)в6}$	T_1	T_2	$K_{U(n)нд}$	$K_{U(n)на}$	T_1	T_2
32	0.010	0.011	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
33	0.019	0.020	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
34	0.038	0.039	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
35	1.068	1.078	68.056	0.000	1.000	1.500	5	0
36	0.031	0.032	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
37	0.267	0.268	0.000	0.000	1.000	1.500	5	0
38	0.012	0.013	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
39	0.015	0.016	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
40	0.006	0.006	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
41	0.035	0.037	0.000	0.000	-	-	-	-
42	0.004	0.004	0.000	0.000	-	-	-	-

Рис. 4. Результаты статистической обработки фазы В на шинах ГРУ 6,3 кВ (выделенный фрагмент соответствует данным графиков рис. 2 и рис. 3)

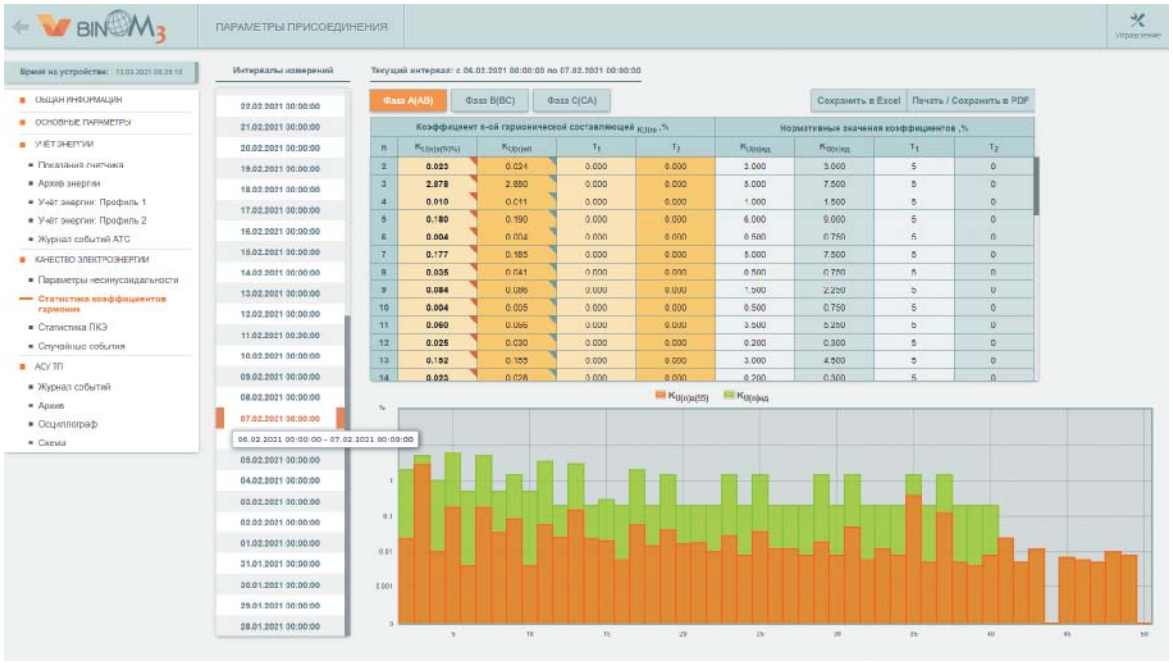

Рис. 5. Результаты статистической обработки $K_{U(n)}$ на секции шин собственных нужд 0,4 кВ

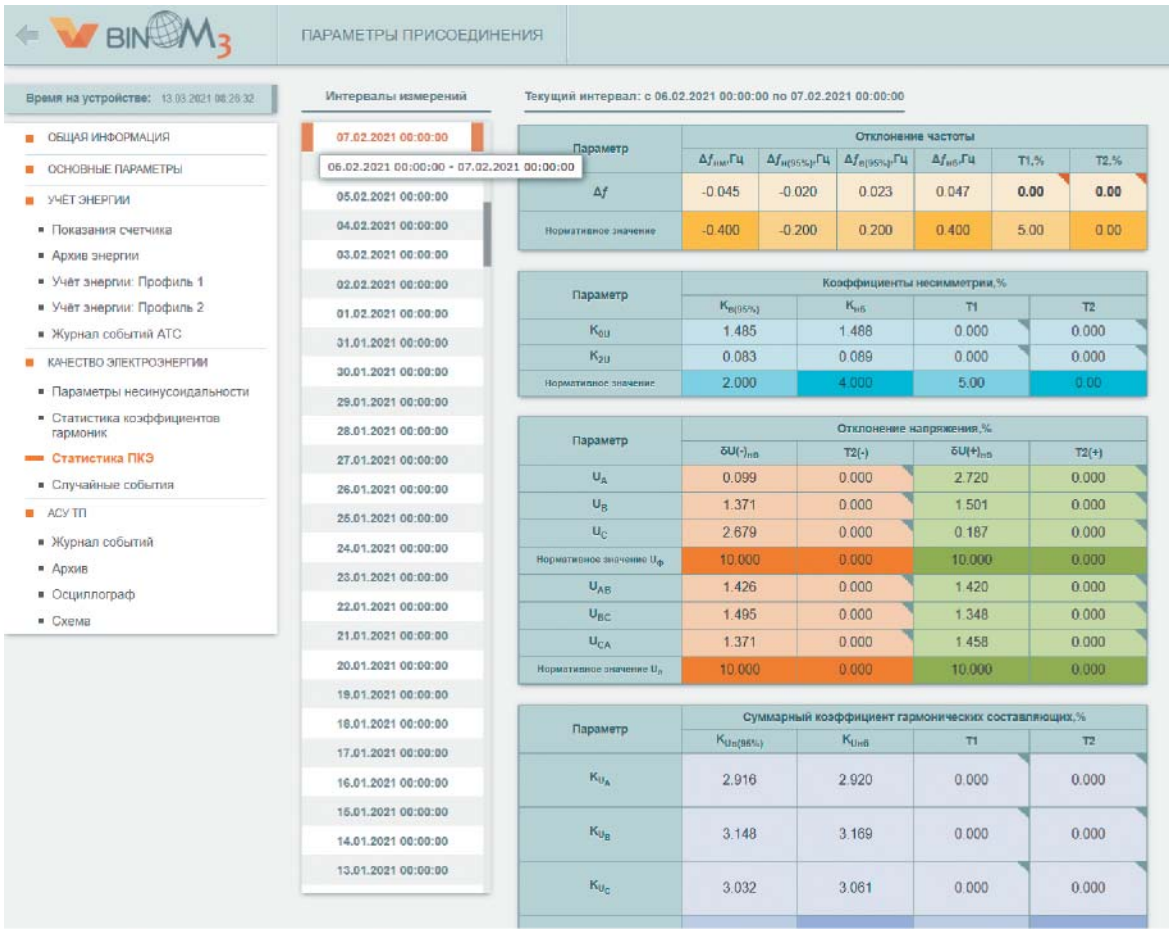

Рис. 6. Результаты статистической обработки Δf, $+\delta U$, $-\delta U$, K_{2U}, K_{0U}, K_U на секции шин собственных нужд 0,4 кВ

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВАЛОВ, ПРЕРЫВАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Нормируемые показатели качества электроэнергии характеризуют продолжительные отклонения значений и формы напряжения от номинального режима. Изменения напряжения, связанные с кратковременными нарушениями, к которым относятся провалы и прерывания напряжения, перенапряжения, характеризуются параметрами, которые не нормируются. В результате анализа положений ГОСТ 32144-2013, ГОСТ 30804.4.30-2013, ГОСТ 33073-2014 в работе выполнена систематизация данных об условиях начала, окончания и характеристиках провалов и прерываний напряжения, перенапряжений (таблица 3).

В этой связи, еще одним вопросом, рассмотренным в работе, является анализ провалов напряжения, зарегистрированных прибором BINOM3 на стороне 0,4 кВ ТСН (на секции собственных нужд). Причинами провалов напряжения в сетях низкого напряжения могут быть переключения в электрических цепях при коротких замыканиях, включение мощной нагрузки (например, электродвигателей), переключения с основного источника питания на резервный и другие кратковременные возмущения.

На рис. 7 приведен фрагмент Журнала событий BINOM3 с выборкой записей о провалах напряжения на секции 0,4 кВ в период с 1 сентября 2020 г. по 13 марта 2021 г. Проведем анализ провала напряжения, зафиксированного 1 октября 2020 г. с параметрами: время начала – 09:09:28, длительность $\Delta t_{пр}$ = 539 мс, глубина $\delta U_{пр}$ = 10,99 % (остаточное напряжение $U_{ост}$ = 195,822 В).

Таблица классификации по глубине и длительности провалов напряжения, соответствующая 1 октября 2020 г., приведена на рис. 8, такая таблица включена в обязательное содержание протокола испытаний электроэнергии по ГОСТ 33073-2014.

События начала и окончания провала напряжения являются условиями пуска цифрового осциллографа в BINOM3 (частота 32 кГц – 640 точек на период промышленной частоты – период записи мгновенных значений тока и напряжения 31,25 мкс).

Осциллограмма фазных напряжений и токов, записанная по условию начала провала напряжения (рис. 9), характерна для возмущения, обусловленного включением электродвигателя [4]. В пусковом режиме асинхрон-

Таблица 3. Определение и характеристики провалов, прерываний напряжения и перенапряжений

№	Вид события	Метод измерений	Условия начала и окончания события	Параметры (не нормируются)
1	*Провал напряжения* – временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения. ГОСТ 32144-2013 (п. 3.1.25, п. 4.3.2) ГОСТ 30804.4.30 (п. 5.4.2)	$U_{скв\,0,5} = \sqrt{\frac{\sum_1^K u_i^2}{K}}$, $U_{скв\,0,5}$ – среднеквадратическое значение напряжения на полупериоде частоты, включает гармоники; U_i – мгновенное значение напряжения (фазное/линейное); K – количество мгновенных значений напряжения на полупериоде частоты; 0,5T – длительность полупериода частоты; при $f_{сети}$ = 50 Гц 0,5T = 10 мс; при $f_{АЦП}$ = 32 кГц K = 320; $U_{оп}$ = ($U_{ном}$ или $U_{согл}$); $U_{оп}$ – опорное напряжение; $U_{ном}$ – номинальное напряжение сети; $U_{ном}$ – согласованное напряжение; $n_ф$ – количество фаз в начале или окончании события.	*Условие начала*: $U_{скв\,0,5} < 0,9 \cdot U_{оп}$, $n_ф \geq 1$. *Условие окончания*: $U_{скв\,0,5} > 0,92 \cdot U_{оп}$, $n_ф = 3$.	$\Delta t_{пр} = t_к - t_н \leq 60$ с, $\Delta t_{пр}$ – длительность провала напряжения; $t_н$ – время начала; $t_к$ – время окончания. $\delta U_{пр} = \frac{U_{оп} - U_{ост}}{U_{оп}} 100\%$, $\delta U_{пр}$ – глубина провала напряжения; $U_{ост} = U_{скв0,5min}$ – остаточное напряжение, минимальное значение напряжения при провале напряжения.
2	*Перенапряжение* – временное возрастание напряжения в конкретной точке электрической системы выше установленного порогового значения. 32144-2013 (п. 3.1.30, п. 4.3.2) ГОСТ 30804.4.30 (п. 5.4.5)		*Условие начала*: $U_{скв\,0,5} > 1,1 \cdot U_{оп}$, $n_ф \geq 1$. *Условие окончания*: $U_{скв\,0,5} < 1,08 \cdot U_{оп}$, $n_ф = 3$.	$\Delta t_{пер} = t_к - t_н \leq 60$ с, $\Delta t_{пер}$ – длительность перенапряжения; $t_н$ – время начала; $t_к$ – время окончания. $K_{пер} = \frac{U_{скв0,5max}}{U_{оп}}$, $K_{пер}$ – коэффициент временного перенапряжения; $U_{скв0,5max}$ – максимальное значение напряжения при перенапряжении.
3	*Прерывание напряжения* – ситуация, при которой напряжение в точке передачи электроэнергии меньше 5 % опорного напряжения. ГОСТ 32144-2013 (п. 3.1.23, п. 4.3.1) ГОСТ 30804.4.30 (п. 5.4.3)		*Условие начала*: $U_{скв\,0,5} < 0,05 \cdot U_{оп}$, $n_ф = 3$. *Условие окончания*: $U_{скв\,0,5} > 0,07 \cdot U_{оп}$, $n_ф \geq 1$.	$\Delta t_{прер} = t_к - t_н$, $\Delta t_{прер}$ – длительность перенапряжения; $t_н$ – время начала; $t_к$ – время окончания. $\delta U_{прер} = \frac{U_{оп} - U_{ост}}{U_{оп}} 100\%$, $\delta U_{прер}$ – глубина прерывания напряжения; $U_{ост} = U_{скв0,5min}$ – остаточное напряжение, минимальное значение напряжения при прерывании напряжения.

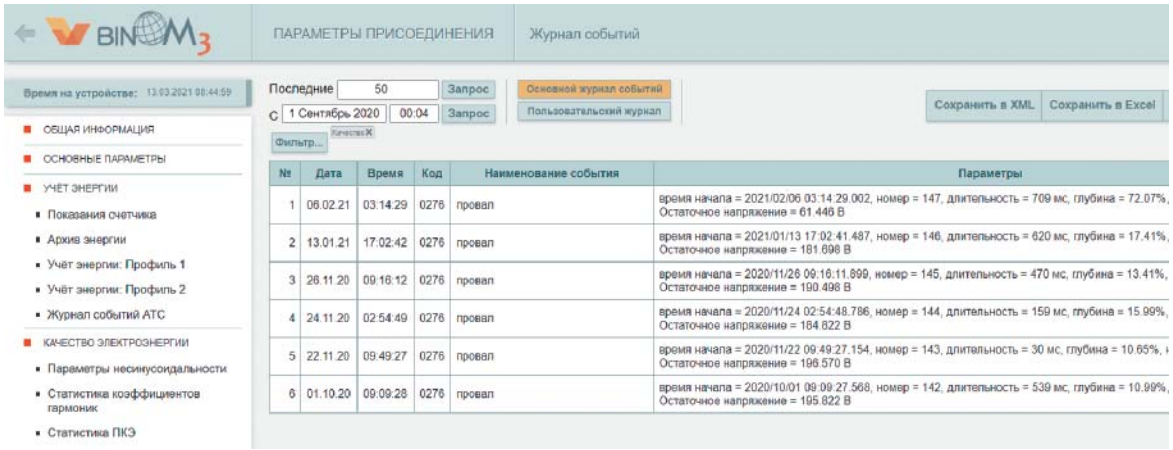

Рис. 7. Журнал событий BINOM3 с выборкой записей о провалах напряжения, зафиксированных в период с 1 сентября 2020 г. по 13 марта 2021 г.

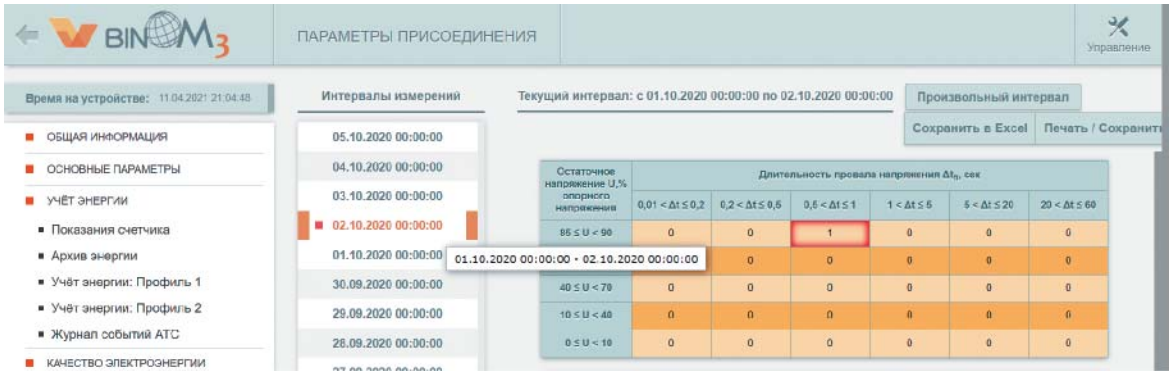

Рис. 8. Таблица классификации провалов напряжения по глубине и длительности от 1 октября 2020 г. (при пуске электродвигателя)

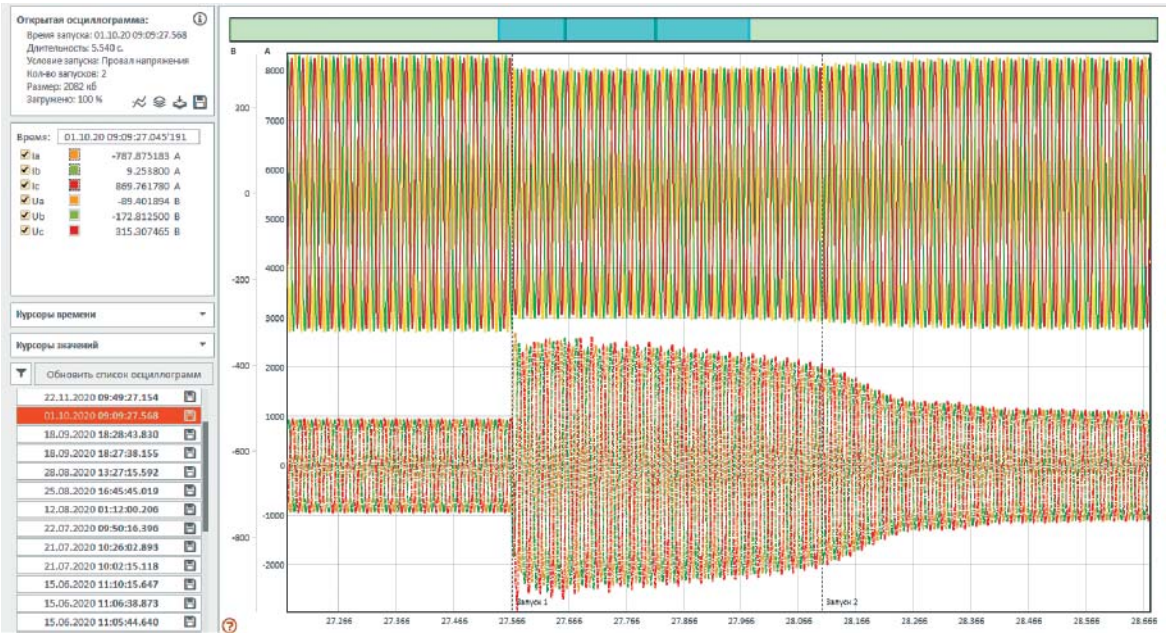

Рис. 9. Осциллограммы фазных токов и напряжений на секции шин 0,4 кВ 1 октября 2020 г. (при включении электродвигателя)

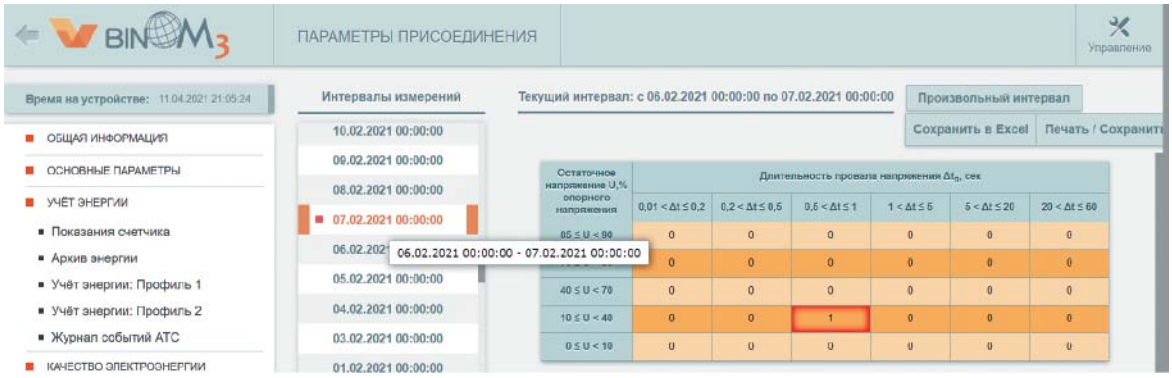

Рис. 10. Таблица классификации провалов напряжения по глубине и длительности от 6 февраля 2021 г. (при внешнем коротком замыкании).

ные электродвигатели потребляют большой ток (в 5-10 раз больше, чем при номинальной скорости вращения), вызывающий падение напряжения на сопротивлении питающей его цепи и уменьшение напряжения на питающей секции шин. По осциллограмме можно судить, что включение электродвигателя произошло 1 октября в 09:09:27.568. Включение сопровождается кратковременным резким увеличением тока в цепи ТСН (примерно от 1000 А до 2500 А с единичным выбросом до 3000 А по амплитудному значению) и резким снижением напряжения на секции собственных нужд. По мере перехода двигателя в номинальный режим работы ток нагрузки собственных нужд уменьшается (примерно до 1250 А по амплитуде), а напряжение на секции восстанавливается. Также из осциллограммы следует, что пусковой ток в цепи ТСН примерно в 6 раз больше тока нормального режима работы вновь подключенной нагрузки (примерно 1500 А по сравнению с 250 А по амплитуде). Из этого можно сделать вывод, что большой пусковой ток двигательной нагрузки явился причиной провала напряжения на секции 0,4 кВ глубиной 10,99 % и длительностью 539 мс.

Рассмотрим провал напряжения, зафиксированный на секции собственных нужд 6 февраля 2021 г. (рис. 7, рис. 10). Параметры провала напряжения: время начала – 03:14:29 длительность $\Delta t_{пр}$ = 709 мс, глубина $\delta U_{пр}$ = 72,07 % (остаточное напряжение $U_{ост}$ = 61,446 В).

В этом случае форма фазных напряжений и токов (рис. 11) отличается и может

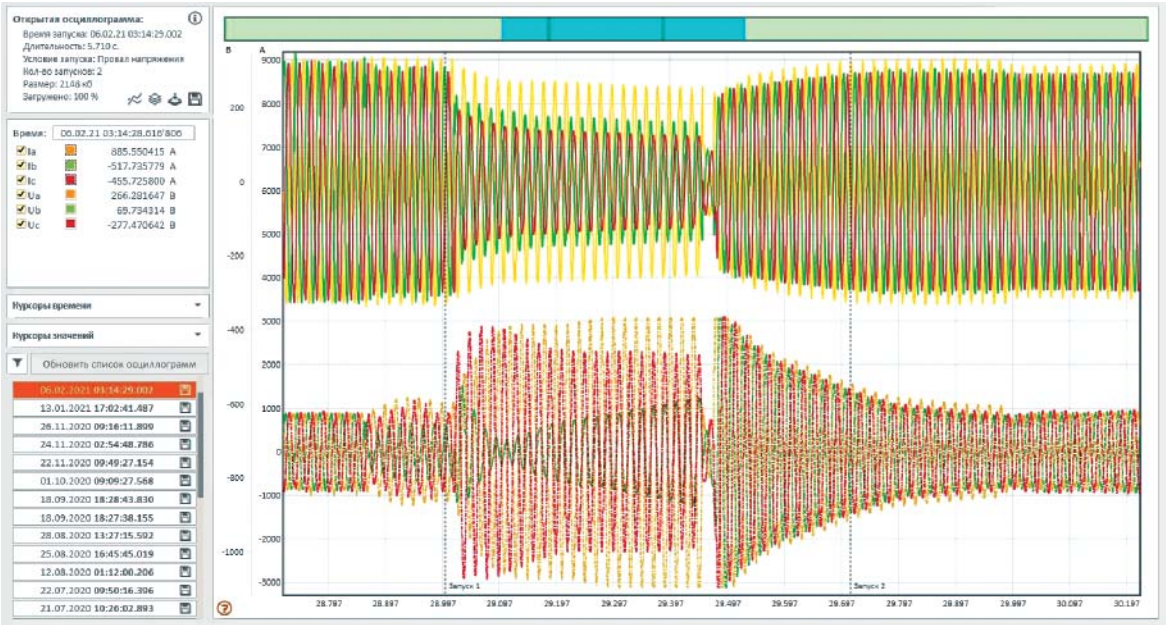

Рис. 11. Осциллограммы фазных токов и напряжений на секции шин 0,4 кВ 6 февраля 2021 г. (при внешнем коротком замыкании)

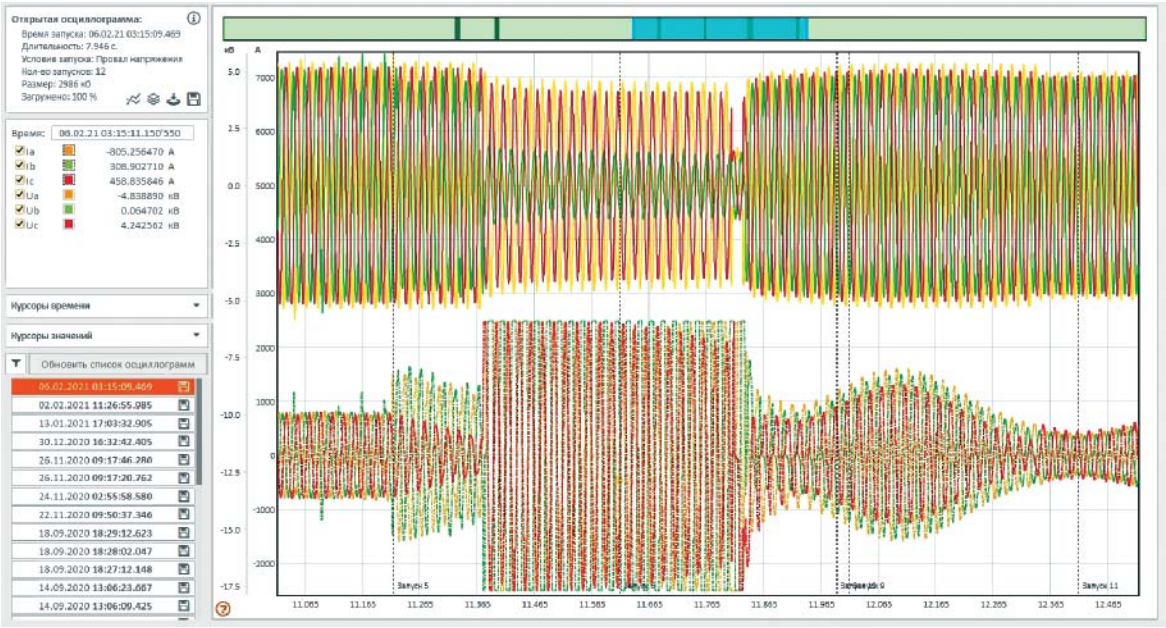

Рис. 12. Осциллограммы фазных токов и напряжений на секции шин 6,3 кВ ГРУ 6 февраля 2021 г. (при внешнем коротком замыкании)

свидетельствовать о воздействии на ток нагрузки собственных нужд провала напряжения, вызванного внешними причинами [4]. В момент начала провала напряжение резко уменьшается в двух фазах с последующим переходом в трехфазный провал, и примерно через 500 мс напряжение восстанавливается. Ток потребления во время и после окончания провала напряжения увеличивается в три раза по сравнению с номинальным режимом работы и возвращается к исходному значению.

На приборе, установленном в цепи статора генератора, также зафиксировано событие провала напряжения на шинах 6,3 кВ ГРУ с параметрами: время начала – 03:15:09, длительность $\Delta t_{пр} = 773$ мс, глубина $\delta U_{пр} = 74{,}05\,\%$ (расхождение в 40 мс с временем начала провала на секции собственных нужд обусловлено тем, что приборы работают автономно и не синхронизированы от единого источника точного времени) и записана осциллограмма (рис. 12). Обеспечение синхронизации приборов от спутниковых навигационных систем, например, с использованием модуля сигналов точного времени DF01, позволит получать осциллограммы, записанные синхронно с точностью до 1 мкс.

Регистрация провалов напряжения осуществлена обоими приборами BINOM3 с примерно одинаковыми параметрами, а осциллограмма в цепи статора генератора имеет характерную форму, соответствующую режиму внешнего короткого замыкания, устраненного при штатном действии защит [2], из чего может быть сделан вывод о том, что причиной провала напряжения на секциях 0,4 кВ 6 февраля 2021 г. явилось трехфазное короткое замыкание со стороны энергосистемы.

В таблице 4 приведены данные о провалах напряжения, зарегистрированных приборами BINOM3 на секциях шин ГРУ 6,3 кВ и секциях СН 0,4 кВ в период с 1 сентября 2020 г. по 31 марта 2021 г.

Таблица 4. Сведения о провалах напряжения на секциях 6,3 кВ ГРУ и 0,4 кВ собственных нужд

№	Дата провала напряжения	Секция ГРУ 6,3 кВ			Секция СН 0,4 кВ		
		Время начала	Длительность, мс	Глубина, %	Время начала	Длительность, мс	Глубина, %
1	09.09.2020	0:30:53	106	10,87	–	–	–
2	01.10.2020	–	–	–	9:09:28	539	10,99
3	22.11.2020	9:50:37	60	12,62	9:49:27	30	10,65
4	24.11.2020	2:55:58	180	25,59	2:54:49	159	15,99
5	26.11.2020	9:17:46	480	15,25	9:16:12	470	13,41
6	30.12.2020	16:32:42	70	12,39	–	–	–
7	13.01.2021	17:03:33	616	15,47	17:02:42	620	17,41
8	02.02.2021	11:26:56	40	11,66	–	–	–
9	06.02.2021	3:15:09	773	74,05	3:14:29	709	72,07

При включении двигателей большой пусковой ток вызывает провал напряжения на секции шин собственных нужд. Провал напряжения при внешнем коротком замыкании также приводит к значительному увеличению тока, потребляемого двигателем, по сравнению с номинальным рабочим током. В обоих случаях увеличенный ток оказывает дополнительное термическое воздействие на изоляцию, сокращая срок ее службы.

ВЫВОДЫ

1. Исследования нормируемых показателей качества электроэнергии на секции 0,4 кВ собственных нужд ТЭЦ МЭИ, проведенных с использованием стационарно установленных приборов BINOM3 в период с 1 сентября 2020 г. по 31 марта 2021 г., подтвердили соответствие качества электрической энергии на секции собственных нужд нормативным значениям по ГОСТ 32144-2013.

2. На основе анализа осциллограмм электромагнитных переходных процессов показано, что причинами провалов напряжения, регистрируемых на секциях собственных нужд 0,4 кВ ТЭЦ, явились возмущения, обусловленные включением двигательной нагрузки и внешними короткими замыканиями со стороны энергосистемы.

3. Стенд, организованный на базе действующего электрооборудования ТЭЦ ФГБОУ “НИУ “МЭИ” и многофункциональных измерительных приборов BINOM3 (ЗАО “Алгоритм”), позволяет проводить инструментальные исследования и осваивать методики анализа режимов работы электрооборудования в реальном времени в дистанционном формате. Представленное техническое решение демонстрирует возможности и эффективность применения цифровых технологий, реализованных в приборах BINOM3, при практическом воплощении концепции цифровой трансформации в электроэнергетике и образовательной деятельности.

Список литературы

1. *Васильева О.А.* Новый стандарт функциональности в промышленной автоматизации: интеллектуальные приборы BINOM3 // Автоматизация и IT в энергетике. 2015, № 12(77), с. 27-34.
2. *Попов М.Г., Васильева О.А., Асаинов Д.Н.* Опыт внедрения цифровых технологий на ТЭЦ на базе многофункциональных измерительных приборов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019, т. 25, № 3, с. 47-58. DOI: 10.18721/JEST.25303.
3. *Popov M.G., Vasilyeva O.A., Sarafanova S.S., Asainov D.N.* “Digital Technologies of Control and Monitoring of Power Supply System Modes at MEI Power Station” 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2019 (2019), DOI: 10.1109/RPA47751.2019.8958074.
4. *Сети* электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии / Куско А., Томпсон М.: пер. с англ. Рободзея А.Н. – М.: Додэка-XXI. 2011, 336 с.
5. *Васильева О.А., Шахова М.А., Шейко А.Е., Марковский Н.А.* Оценка влияния несинусоидальной нагрузки на потери мощности и пропускную способность силового кабеля // Автоматизация и IT в энергетике. 2021, № 4(141), с. 48-57.

Васильева Ольга Алексеевна *– канд. техн. наук, доцент ВШВЭ Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО “СПбПУ”), генеральный директор ЗАО “Алгоритм”,*
Шахова Мария Алексеевна *– канд. техн. наук, доцент ВШВЭ Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО “СПбПУ”), директор учебного центра ЗАО “Алгоритм”,*
Симонов ВладимирВладимирович *– студент 4 курса ВШВЭ Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО “СПбПУ”),*
Кокулин Арсений Андреевич *– студент 4 курса ВШВЭ Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО “СПбПУ”),*
Фрейцис Евгений Михайлович *– студент 4 курса ВШВЭ Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО “СПбПУ”).*