



DOI: 10.18721/JEST.25303

УДК 621.311 : 621.314 : 621.316 : 621.317

М.Г. Попов¹, О.А. Васильева¹, Д.Н. Асаинов²

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

2 – Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТЭЦ НА БАЗЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В статье представлены результаты исследований проблемы качества электроэнергии, электромагнитных переходных процессов системы электроснабжения энергетического комплекса Национального исследовательского университета «МЭИ». Приведенные в публикации практические примеры акцентированы на возможностях и эффективности применения цифровых технологий анализа режимов работы электрооборудования, которые реализуются в современных многофункциональных интеллектуальных устройствах BINOM3. Исследования показателей качества электрической энергии на ТЭЦ МЭИ выявили отклонения по 35-й гармонической составляющей напряжения. В результате физических экспериментов и цифровой обработки электрических сигналов установлено, что источниками искажений, вносимых во внешнюю электрическую сеть являются выпрямительные блоки, коммутируемые в схеме управления возбуждением турбогенератора. Эти схемы двух-(шести)-полупериодного выпрямления имеются в электромашинной системе возбуждения генератора с генератором постоянного тока – в цепях электромагнитного корректора и схеме токового компаундирования. На основе исследований и анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов на ТЭЦ МЭИ произведена оценка показателей качества электроэнергии в нестационарных режимах работы энергокомплекса. Установлено, что по чувствительности и быстродействию системы регулирования частоты, мощности и возбуждения турбогенератора полностью соответствуют требованиям ГОСТ 32144.

Ключевые слова: качество электрической энергии, система электроснабжения, цифровые технологии, интеллектуальные электрические сети, нестационарные режимы.

Ссылка при цитировании:

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

M.G. Popov¹, O.A. Vasilyeva¹, D.N. Asainov²

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Moscow power engineering institute, Moscow, Russia

EXPERIENCE OF INTRODUCING DIGITAL TECHNOLOGIES BASED ON MULTIFUNCTIONAL MEASURING METERS AT POWER STATION

The article presents the results of studies of the power quality problem, electromagnetic transients of the power supply system of the energy complex of the MPEI National Research University. The practical examples given in the publication are focused on the possibilities and efficiency of using digital technologies for analyzing the operating modes of electrical equipment which are implemented in modern

multifunctional intelligent devices BINOM3. Studies of the quality of electrical energy at the Power Station of MPEI revealed deviations in the 35th harmonic component of the voltage. As a result of physical experiments and digital processing of electrical signals, it was found that the sources of distortion introduced into the external electrical network are the rectifying blocks switched in the control circuit of the generator excitation. These schemes of two-(six)-half-period rectification are available in the electric machine excitation system of the generator with a DC generator, in the circuits of the electromagnetic corrector and the current compounding scheme. Based on research and analysis of electromagnetic and electromechanical transients at the Power Station of MPEI, indicators of power quality in non-stationary modes of operation of the power complex were assessed. It is established that the sensitivity and speed of the frequency control system, power and excitation of the turbine generator fully comply with the requirements of GOST 32144.

Keywords: power quality, power supply system, digital technologies, Smart Grid, non-stationary modes.

Citation:

M.G. Popov, O.A. Vasilyeva, D.N. Asainov, Experience of introducing digital technologies based on multifunctional measuring meters at power station, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 47–58. DOI: 10.18721/JEST.25303

Введение. В соответствии с программой развития цифровых технологий Единая энергетическая система (ЕЭС) России должна развиваться с учетом прогрессивных технологий самоконтроля, анализа и отчетности «интеллектуальных активно-адаптивных сетей» или «Smart Grid» (self-monitoring analysis and reporting technology). Концепция создания такого рода «умных» электрических сетей базируется на широком применении следующих технологических процессов:

- цифровизация (цифровое преобразование) физических (аналоговых) величин и данных;
- хранение больших массивов данных (Big Data), их цифровая обработка и оперативный экспресс-анализ;
- применение распределенных систем и ресурсов для хранения информации;
- внедрение технологий «искусственного интеллекта» для управления и оптимизации технологических процессов производства, распределения и потребления электрической энергии;
- применение мобильных технологий мониторинга и контроля состояния силового электрооборудования и энергообъекта в целом.

С развитием информационных технологий повышаются требования к наблюдаемости и достоверности оценки режимов работы элек-

тросетей и энергосистем. В частности, состояние одного трехфазного присоединения распределительного устройства может быть охарактеризовано более, чем 2000 параметров. При этом с учетом нормативных требований некоторые параметры должны усредняться на интервале 200 мс, а для оценки провалов напряжения, прерываний электроснабжения и перенапряжений – на полупериоде основной частоты. В целом для контроля (мониторинга состояния) одного электрического присоединения в течение 1 минуты требуется цифровая обработка более 600 000 измеренных (преобразованных) значений электрических сигналов.

Для обеспечения такой скорости цифровой обработки информации необходима специализированная архитектура системы контроля и мониторинга, в которой функции обработки, накопления, использования информации сосредоточены на полевом уровне, непосредственно у её источника (электрического присоединения) [1, 2]. Эта архитектура реализована в многофункциональных микропроцессорных средствах измерения и контроля показателей качества электрической энергии серии BINOM3 (Свидетельство об утверждении типа СИ RU.C.34541.A № 58154/1, регистрация в Государственном реестре СИ под № 60113-15).



Обеспечение интенсивного и безопасного развития электроэнергетической системы (ЭЭС) России с учетом новых требований возможно только при создании и наладке отечественного производства основных компонентов Smart Grid, а также при их постоянной производственной диагностике и развитии. Для этого требуется внедрение обновленных учебных программ и стандартов в профильных ВУЗах, обучение и повышение квалификации оперативного и эксплуатационного персонала энергосистем. Такое взаимодействие было осуществлено между ФГАОУ ВО «СПбПУ», ЗАО «Алгоритм» и ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», имеющего в своем административно-хозяйственном и оперативном управлении систему электроснабжения, включающую собственный источник генерации (ТЭЦ МЭИ), работающий параллельно центральной энергосистемой.

Основной целью этой работы является оценка показателей качества электроэнергии и эффективности действия систем управления возбуждением и мощностью турбогенератора в нестационарных режимах его работы, обусловленных аварийными событиями в системе электроснабжения энергокомплекса.

Описание методики и объекта исследований

На рис. 1 представлена упрощенная схема электроэнергетического комплекса ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» с указанием мест установки приборов VINOM3. В составе действующего паросилового блока находятся паровой котел типа БМ-35-РФ производительностью 50 т/ч, паротурбинная установка типа П-6-35(5М) с турбогенератором типа Т-6-2ЕУ3 мощностью 6 МВт. Турбогенератор выдает мощность на ГРУ напряжением 6,3 кВ, от которого осуществляется электроснабжение собственных нужд станции через ТСН1 и ТСН2 напряжением 6/0,4 кВ. Выдача мощности местному

потребителю ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» осуществляется через повышающие трансформаторы ТС1 и ТС2 на шины напряжением 10 кВ распределительного пункта РП-10114. Связь с центральной энергосистемой осуществляется с помощью двух кабельных линий СБ-150, по которым выдается избыточная электроэнергия и производится резервирование электроснабжения местного потребителя. Штриховой линией на рисунке (в области КРУ 10 кВ) также отмечен второй строящийся энергоблок ПГУ на базе газотурбинной установки типа GРВ 80D мощностью 7,5 МВт, котла-утилизатора типа КГТ 11,6-3,9-440, паротурбинной установки типа П 2,5/10,5-3,8/0,5 с турбогенератором ТПС-2,5-2ЕУ3.

С помощью приборов VINOM3 осуществляются измерения и контроль режимных параметров в цепи статора турбогенератора Г1, с номинальным напряжением 6,3 кВ и мощностью 6 МВт. Кроме этого производится мониторинг трансформатора ТСН1 со стороны 0,4 кВ. Алгоритмы измерений и статистической обработки ПКЭ реализованы в полном соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.7-2103 (IEC 61000-4-7:2009) и ГОСТ 30804.4.30-2103 (IEC 61000-4-30:2008).

Оценку искажений, вносимых во внешнюю электрическую сеть, и их влияние на показатели качества электрической энергии будем производить на основании спектрального анализа сигналов напряжения. При этом основное внимание будем уделять анализу высших гармонических составляющих.

Результаты исследований нестационарных режимов ТЭЦ МЭИ

На рис. 2 изображены экранные формы прикладного программного обеспечения с результатами цифровой обработки измерений, выполненных в период с 11 октября по 25 ноября 2018 года.

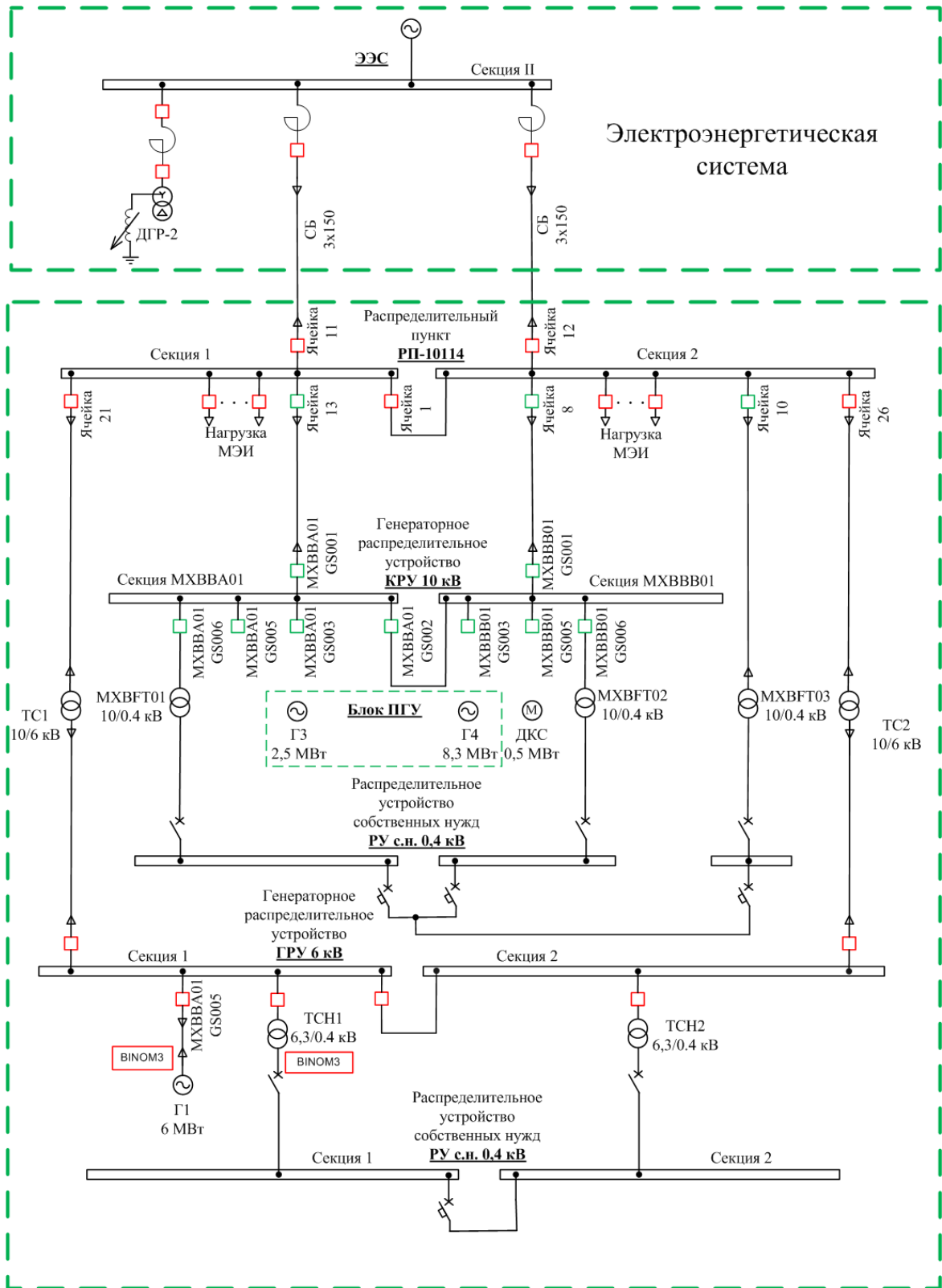


Рис. 1. Фрагмент главной схемы электрических соединений ТЭЦ МЭИ.
 Fig. 1. Fragment of the main scheme of electrical connections of Power Plant of MPEI

Интервалы измерений Текущий интервал: с 19.11.2018 00:00:00 по 20.11.2018 00:00:00

Фаза A(AB) Фаза B(BC) Фаза C(CA)

Сохранить в Excel Печать / Сохранить в PDF

| n | Коэффициент n-ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$, % | | | | Нормативные значения коэффициентов, % | | | |
|----|--|--------------|---------|-------|---------------------------------------|--------------|-------|-------|
| | $K_{U(n)95\%}$ | $K_{U(n)95}$ | T_1 | T_2 | $K_{U(n)нд}$ | $K_{U(n)нд}$ | T_1 | T_2 |
| 30 | 0.003 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.300 | 5 | 0 |
| 31 | 0.039 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 1.500 | 5 | 0 |
| 32 | 0.005 | 0.006 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.300 | 5 | 0 |
| 33 | 0.024 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.300 | 5 | 0 |
| 34 | 0.022 | 0.024 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.300 | 5 | 0 |
| 35 | 1.364 | 1.378 | 100.000 | 0.000 | 1.000 | 1.500 | 5 | 0 |
| 36 | 0.019 | 0.021 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.300 | 5 | 0 |
| 37 | 0.253 | 0.260 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 1.500 | 5 | 0 |

Рис. 2. Результаты статистической обработки дискретного спектра ($K_{U(n)}$ – коэффициентов гармоник n -го порядка) сигналов фазных напряжений на шинах ГРУ 6 кВ

Fig. 2. Results of statistical processing of discrete spectrum ($K_{U(n)}$ – coefficients of n -th order harmonics) of phase voltage signals on 6 kV buses of generators

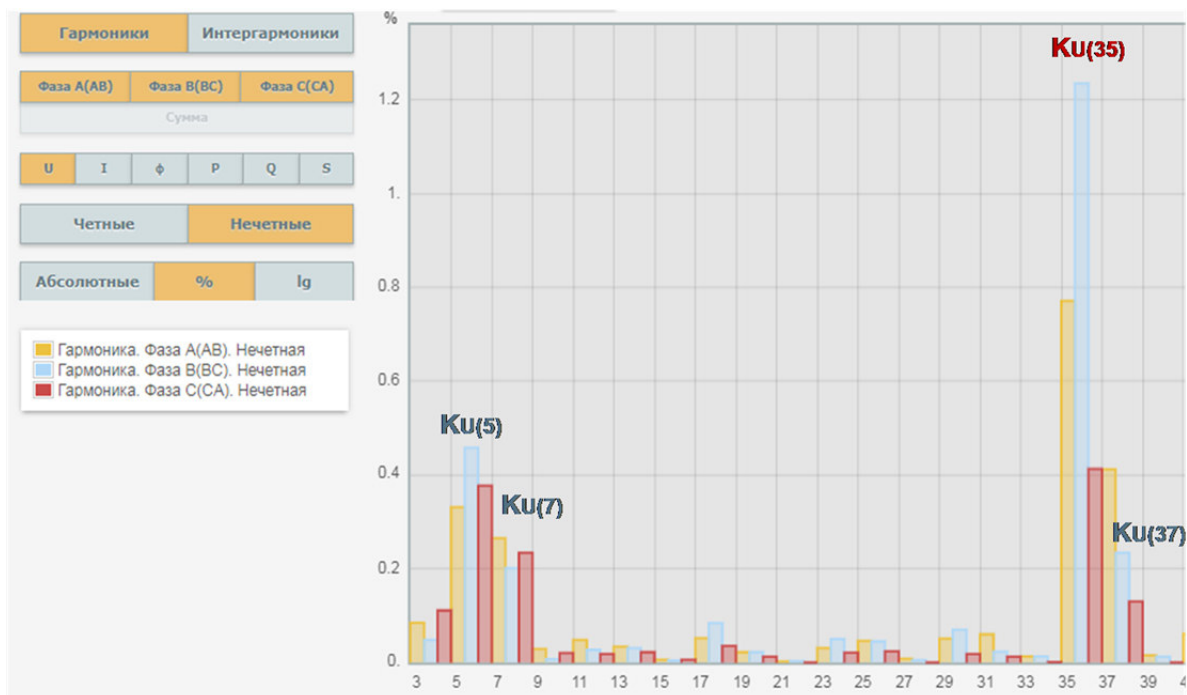


Рис. 3. Дискретный спектр фазных напряжений на выводах турбогенератора

Fig. 3. The discrete spectrum of the phase voltages at the terminals of the turbogenerator

В результате анализа показателей качества электроэнергии на шинах собственных нужд 0,4 кВ установлено, что качество электроэнергии полностью соответствует требованиям ГОСТ 32144. И, наоборот, на секции сборных шин ГРУ на всем интервале наблюдения (цифровой обработки) превышены нормативные

значения (более 1 %) долевого содержания 35-й гармоники фазного (фазы В) напряжения, $K_{U(35)95\%} = 1,36\%$ (рис. 2, выделенный фрагмент). При этом гармоники с 5-м и 7-м порядковыми номерами вносят значительно меньшие искажения (рис. 3) по сравнению с 35-й и 37-й гармоническими составляющими.

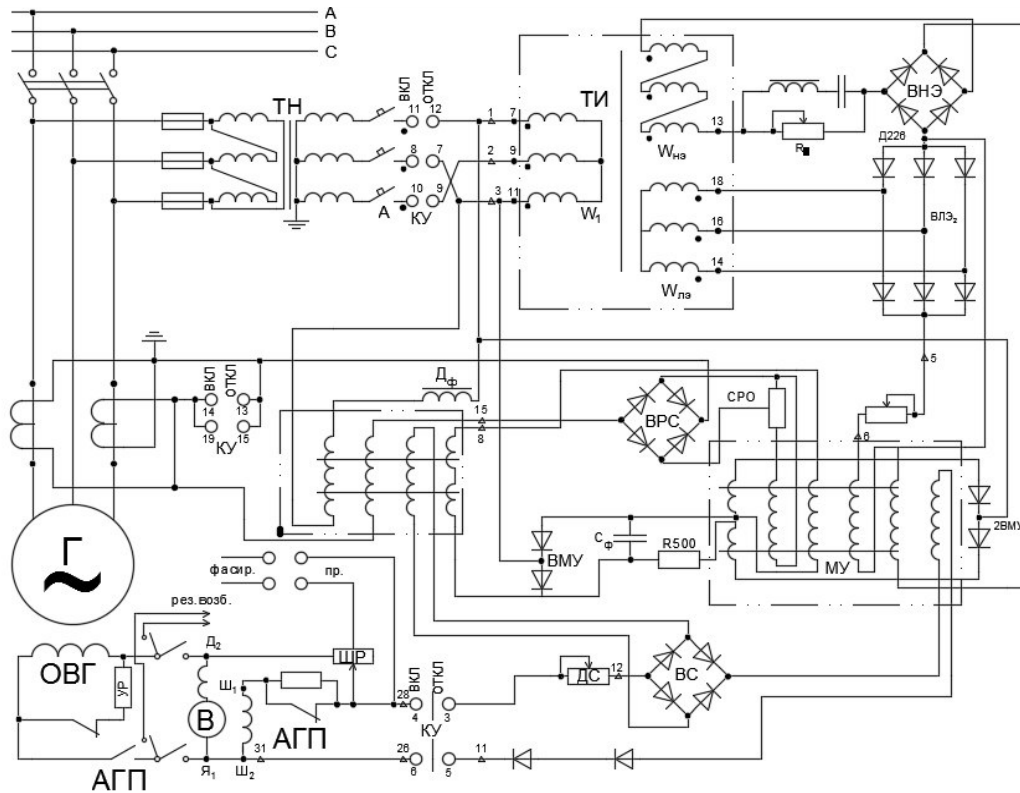


Рис. 4. Структура электромашинной системы возбуждения генератора ТЭЦ МЭИ с электромагнитным корректором.

Fig. 4. The structure of the electric excitation system of the generator of Power Plant MEI with electromagnetic corrector.

Выполненный сравнительный анализ показал, что источниками этих искажений, проявляющихся наличием гармоник порядков $n = 4k \pm 1$, $n = 6k \pm 1$ (где $k = 1, 2, \dots$) [3–5], являются выпрямительные блоки с импульсными преобразователями. Такие схемы двух-(шести)-полупериодного выпрямления имеются в электромашинной системе возбуждения генератора с генератором постоянного тока (рис. 4) – в цепях электромагнитного корректора и в схеме токового компаундирования. Регулирование напряжения возбуждения турбогенератора осуществляется с помощью быстродействующего регулятора напряжения РНА-60, который подключается к вторичным выводам трансформаторов тока и напряжения, коммутируемым со стороны его шинных выводов обмотки статора.

Данный тезис об источнике искажений был подтвержден при проведении физических экспериментов по изменению режима работы генератора (изменению тока возбуждения машины), а также при его переводе на резервную систему возбуждения. Для подавления высших гармонических составляющих дана рекомендация по установке дополнительных фильтров на шинах ГРУ 6 кВ.

Еще одним предметом исследований, выполненных в настоящей работе, являлось определение чувствительности и быстродействия систем регулирования частоты, напряжения и мощности турбоагрегата. Эти параметры систем автоматического управления определялись в результате анализа и цифровой обработки осциллограмм аварийных событий, зафиксированных в сентябре, октябре 2018 года мно-

гофункциональными электронными устройствами марки VINOM3. Далее выполнен анализ наиболее характерных нестационарных режимов работы системы электроснабжения энергокомплекса ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», обусловленных внешним междуфазным коротким замыканием (КЗ) или выделением ТЭЦ МЭИ на автономную (изолированную от центральной энергосистемы) работу.

На рис. 5 приведены цифровые осциллограммы фазных напряжений и токов турбогенератора в режиме междуфазного КЗ, зафиксированного 16 сентября 2018 года. Регистрация этого аварийного события была осуществлена в 20:02:14.257 обоими приборами VINOM3 по факту снижения (провала) напряжения с глубиной провала напряжения около 24,2 %. Спустя 130 мс внешнее КЗ было устранено при штатном (селективном) действии защит, что привело к сохранению

устойчивой параллельной работы турбогенератора с центральной энергосистемой. Этот нестационарный режим характеризуется затухающими (декремент затухания $\alpha = -0,68 \text{ с}^{-1}$) электромагнитными колебаниями периодом 0,65...0,75 с.

Следует также отметить характерную особенность работы вышеописанной системы возбуждения с электромагнитным корректором (ЭМК), которая наиболее ярко проявляется в первоначальной стадии послеаварийного режима – сразу после отключения КЗ (рис. 5, интервал времени $t \in [14,4 \text{ с}; 14,65 \text{ с}]$). В указанный период времени реакция от схемы токового компаундирования незначительна, а регулирование возбуждения осуществляется в основном за счет сигнала ЭМК. При этом имеет место запаздывание около 240–250 мс, обусловленное в целом постоянной времени электромашиного возбудителя.

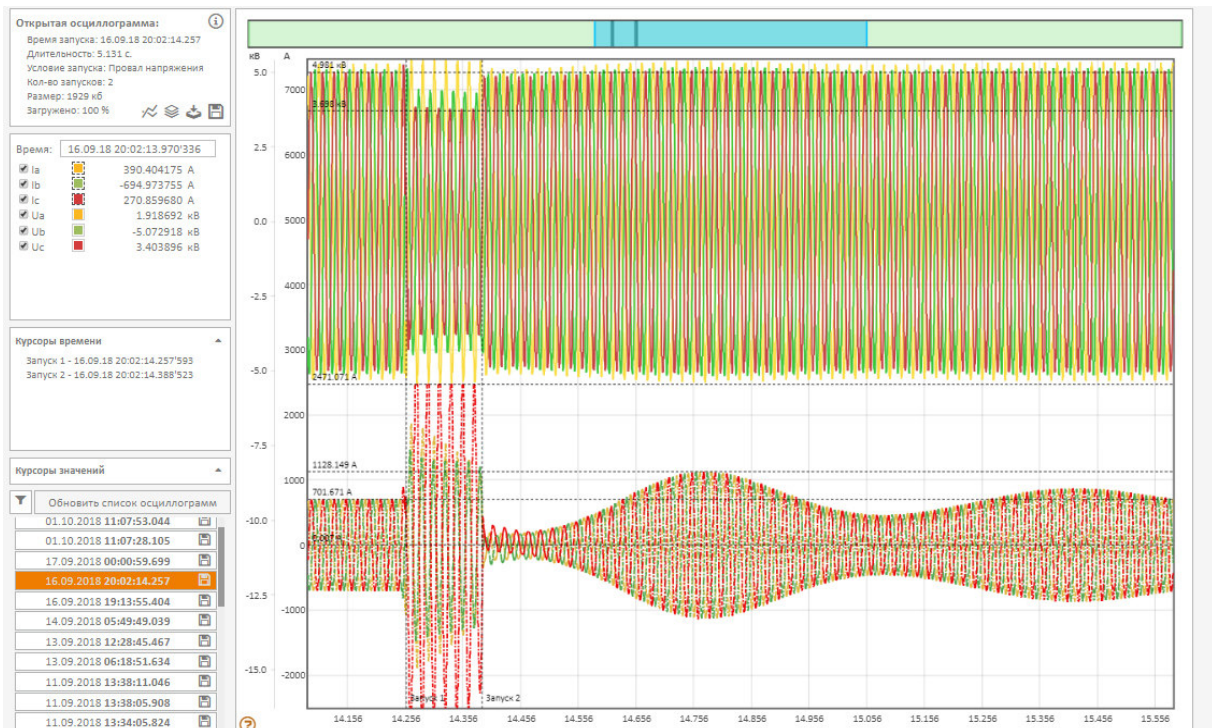


Рис. 5. Осциллограммы фазных токов и напряжений генератора в режиме внешнего двухфазного короткого замыкания.

Fig. 5. Oscillograms of phase currents and generator voltages in the mode of external two-phase short circuit.



Рис. 6. Изменение активной мощности, частоты и среднеквадратичных значений фазных напряжений генератора при его выделении на изолированную работу (а) и последующей его ресинхронизации (б)

Fig. 6. Changes in the active power, frequency and RMS values of the phase voltages of the generator when it is isolated for isolated operation (a) and its subsequent resynchronization (b)

Оценка эффективности систем управления частотой и мощностью турбогенератора осуществляется в результате анализа нестационарных режимов его автономной и параллельной работы с энергосистемой. Для этого выполним краткое описание и анализ выделения ТЭЦ МЭИ на автономную

работу, которое произошло 19 октября 2018 года. Характер изменения режимных параметров турбогенератора при выделении ТЭЦ МЭИ на изолированную от центральной энергосистемы работу и последующей с ней синхронизацией показаны на графиках рис. 6, а, б.



Из анализа графиков рис. 6, а следует, что до момента времени $t_1 = 13:29$ энергокомплекс ($S_{\Gamma} = 5,64 + j 1,04$ МВА) работает параллельно с энергосистемой с выдачей мощности по второй кабельной линии связи (ячейка № 12 в РП-10114 включена), действующие значения фазных напряжений (3,50–3,72 кВ) находятся в допустимых пределах.

В момент времени $t_1 = 13:29$ происходит отключение второй кабельной линии связи со стороны энергосистемы, что приводит к увеличению частоты до значения 50,7 Гц (рис. 6, а). Далее в течение одной минуты ($t \in [13:29; 13:30]$) происходит разгрузка турбоагрегата в результате действия АРЧМ, характеризующаяся снижением нагрузки агрегата до уровня 4 МВт (потребление с шин РП-10114, а также в системе собственных нужд).

Далее, по факту выданного диспетчером разрешения ($t_3 = 13:58$) была собрана схема синхронизации с отключением секционного выключателя в РП-10114, а также выключателя ТС 1 (ячейка 26, рис. 1) и, как следствие этого, отключением половины потребителей «НИУ «МЭИ» и дальнейшей разгрузкой агрегата до 2,1 МВт на время оперативных переключений. При этом было выявлено повышение частоты до уровня 51,28 Гц (рис. 6, а, момент времени $t_3 = 13:58$).

В период времени 13:58–14:17 было произведено включение выключателя ячейки № 12 в РП-10114 с последующим восстановлением питания потребителей, что в конечном итоге привело к разделению системы электроснабжения энергокомплекса «НИУ МЭИ» на две несинхронно работающие части. В момент времени $t_4 = 14:17$ на выключателе 6 кВ в цепи ТС2 произведена синхронизация ТЭЦ МЭИ с энергосистемой и восстановлена нормальная схема электроснабжения всех потребителей энергокомплекса.

Проводя анализ графиков изменения частоты и фазных напряжений в режиме изолированной работы ТЭЦ (рис. 6, а), следует от-

метить, что наибольшее значение отклонения частоты составило 1,28 Гц, с относительным временем превышения предельно допустимого значения (0,4 Гц) около 0,1 %. В то же время отклонения фазных напряжений находились в нормативных пределах.

Здесь необходимо напомнить, что в соответствии с требованиями ГОСТ 32144 частота должна поддерживаться на уровне $50 \pm 0,2$ Гц в течение 95 % (относительно всей продолжительности) времени интервала наблюдений. Также на всем контролируемом интервале времени отклонения частоты относительно синхронной не должны превышать за диапазон $\pm 0,4$ Гц. Однако, в автономных (изолированных) системах электроснабжения требования по предельно допустимому отклонению частоты менее жесткие, их величина не должна быть более ± 5 % ($\pm 2,5$ Гц).

С учетом этого замечания в результате анализа нестационарных режимов системы электроснабжения следует важный тезис (вывод) о полном соответствии по чувствительности и быстродействию систем регулирования частоты, мощности и возбуждения турбогенератора требованиям ГОСТ 32144, регламентирующем нормативные показатели (критерии) качества электроэнергии.

Наличие архивов* цифровой и статистической обработки, а также всех показателей качества электрической энергии в многофункциональных электронных устройствах марки BINOM3 позволили провести анализ и установить причины нарушений ПКЭ. В дополнение к функциям учета, контроля качества электрической энергии, осциллографирования наличие функций телесигнализации и

* Online доступ (логин: User, пароль: 1) для чтения архивной информации осуществляется по гиперссылкам:

• <http://hpc-ec1.mpei.ru/index.html> (BINOM337 на стороне 0,4 кВ ТСН);

• <http://hpc-ec2.mpei.ru/index.html> (BINOM337 на шинных выводах Г1).

телеуправления в приборах VINOM3 позволяют использовать их при построении электрических сетей в рамках «Цифровой трансформации энергетики».

Выводы

1. Исследования показателей качества электрической энергии на ТЭЦ МЭИ выявили отклонения по 35-й гармонической составляющей напряжения. В результате физических экспериментов и цифровой обработки электрических сигналов установлено, что источниками искажений, вносимых во внешнюю электрическую сеть являются выпрямительные блоки, коммутируемые в схеме управления возбуждением турбогенератора. Для подавления высших гармонических составляющих сформулирована рекомендация по установке дополнительных фильтров.

2. На основе исследования и анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов на ТЭЦ МЭИ произведена оценка показателей качества электроэнергии в нестационарных режимах работы энергокомплекса. Установлено, что по чувствительности и быстродействию системы регулирования частоты, мощности и возбуждения турбогенератора полностью соответствуют требованиям ГОСТ 32144.

3. Опыт промышленной эксплуатации приборов VINOM3 показал высокую степень их готовности к внедрению в «умных» электрических сетях с поддержкой функций оцифровки и хранения больших объемов данных, оперативного анализа, адаптивного анализа с применением технологий «искусственного интеллекта», а также функций мониторинга и контроля с использованием мобильных технологий передачи данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Васильева О.А.** Новый стандарт функциональности в промышленной автоматизации: интеллектуальные приборы VINOM3 // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2015. № 12 (77). С. 27–34.
- [2] **Васильева О.А.** Применение интеллектуальных счетчиков «VINOM3» для контроля и управления качеством электрической энергии // Управление качеством электроэнергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 26–28 ноября 2014 г.). М.: Центр полиграф. услуг «Радуга», 2014. С. 69–78.
- [3] **Большаков О.В., Васильева О.А.** О происхождении и измерении гармонических искажений в электрических сетях // Управление качеством электрической энергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 23–25 ноября 2016 г.). М.: Центр полиграф. услуг «Радуга», 2017. С. 57–74.
- [4] **Васильева О.А., Шахова М.А.** Качество электрической энергии в системах электроснабжения с выпрямительной преобразовательной нагрузкой // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2018. № 11 (112). С. 34–41.
- [5] **Vanin V., Bulychov A., Popov M., Vasilyeva O., Shakhova M.** Measurement of currents and voltages non-sinusoidal parameters in power supply systems with rectifier load // MATEC Web of Conference 245, 06007 (2018). EECE-2018
- [6] **Vanin V., Bulychov A., Popov M., Vasilyeva O., Shakhova M.** About influence of non-sinusoidal currents and voltages on the amount of the electric energy // MATEC Web of Conference 245, 06009 (2018). EECE-2018.
- [7] **Васильева О.А., Асаинов Д.Н.** Исследование качества электроэнергии и электромагнитных переходных процессов на ТЭЦ МЭИ с помощью многофункциональных счетчиков измерителей VINOM3 // Управление качеством электроэнергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, декабрь 2018 г.). М.: Центр полиграф. услуг «Радуга», 2019.
- [8] Wide Area Protection & Control Technologies CIGRE, Working Group B5.14 Paris, 2016.
- [9] **Moakeev A.** Digital Substation. URL: <http://digitalsubstation.com>
- [10] **Moakeev A.** Proceedings IEEE International Conference SIBCON, 2017.
- [11] **Moakeev A., Bovykin V., Miklashevich A., Ulyanov D.** Proceedings International Conference Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation, 2015.
- [12] **Пышин П., Чусовитин П.** Relay Protection and Automation. 2014. 4. P. 16–22.



[13] **Kezunovic M., Meliopoulos S., Venkatasubramanian V., Vittal V.** Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks. Springer, N. Y., 2014

[14] **Mokeyev A.V., Bovykin V.N., Khromtsov E.I., Miklashevich A.V., Orlov F.Y., Ulyanov D.N.** Intelligent Electronic Devices for Digital Substations 110(35)/6 KV // 5th International Scientific and Technical Conference Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation Sochi, 2015.

[15] **Mokeyev A.V., Bovykin V.N.** Intelligent devices for digital substations (2015) The New in Russian Electric Power Industry, (4), pp. 40–48.

[16] **Mokeyev A.V., Pereygin L.N., Khromtsov E.I.** Combined 6-35 kV current and voltage transducers // The New in Russian Electric Power Industry. 2017. 1. P. 39–52.

[17] **Soldatov A.V., Antonov V.I., Naumov V.A., Ivanov N.G., Aleksandrova M.I.** Information base of protection for a generator from single-phase earth faults of the stator with monitoring of the higher harmonics of the differential current // Rel. Zashch. Avtomat, 2016. 3 (24). P. 12–20.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОПОВ Максим Георгиевич – доктор технических наук заведующий кафедрой «Электрические станции и автоматизация энергосистем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

ВАСИЛЬЕВА Ольга Алексеевна – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: vasilieva_oa@spbstu.ru

АСАИНОВ Данил Нуриддинович – кандидат технических наук доцент Национального исследовательского университета «МЭИ»

E-mail: AsainovDN@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 08.07.2019

REFERENCES

[1] **O.A. Vasilyeva**, Novyy standart funktsionalnosti v promyshlennoy avtomatizatsii: intellektualnyye pribory BINOM3, Avtomatizatsiya i IT v energetike. 2015. № 12 (77). С. 27–34.

[2] **O.A. Vasilyeva**, Primeneniye intellektualnykh schetchikov «BINOM3» dlya kontrolya i upravleniya kachestvom elektricheskoy energii, Upravleniye kachestvom elektroenergii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 26–28 noyabrya 2014 g.). M.: Tsentr poligraf. uslug «Raduga», (2014) 69–78.

[3] **O.V. Bolshakov, O.A. Vasilyeva**, O proiskhozhdenii i izmerenii garmonicheskikh iskazheniy v elektricheskikh setyakh, Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 23–25 noyabrya 2016 g.). M.: Tsentr poligraf. uslug «Raduga», (2017) 57–74.

[4] **O.A. Vasilyeva, M.A. Shakhova**, Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya s vypryamitelnoy preobrazovatelnoy nagruzkoy, Avtomatizatsiya i IT v energetike, 11 (112) (2018) 34–41.

[5] **V. Vanin, A. Bulychov, M. Popov, O. Vasilyeva, M. Shakhova**, Measurement of currents and voltages non-sinusoidal parameters in power supply systems with rectifier load, MATEC Web of Conference 245, 06007 (2018). EECE-2018.

[6] **V. Vanin, A. Bulychov, M. Popov, O. Vasilyeva, M. Shakhova**, About influence of non-sinusoidal currents and voltages on the amount of the electric energy, MATEC Web of Conference 245, 06009 (2018). EECE-2018.

[7] **O.A. Vasilyeva, D.N. Asainov**, Issledovaniye kachestva elektroenergii i elektromagnitnykh perekhodnykh protsessov na TETs MEI s pomoshchyu mnogofunktsionalnykh schetchikov izmeriteley BINOM3, Upravleniye kachestvom elektroenergii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, dekabr 2018 g.). M.: Tsentr poligraf. uslug «Raduga», 2019.

[8] (2016) Wide Area Protection & Control Technologies CIGRE, Working Group B5.14 Paris

[9] **A. Mokeyev**, Digital Substation. URL: <http://digitalsubstation.com>

- [10] **A. Mokeev**, Proceedings IEEE International Conference SIBCON, 2017.
- [11] **A. Mokeev**, **V. Bovykin**, **A. Miklashevich**, **D. Ulyanov**, Proceedings International Conference Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation, 2015
- [12] **P. Ilyshin**, **P. Chusovitin**, Relay Protection and Automation, 4 (2014) 16–22
- [13] **M. Kezunovic**, **S. Meliopoulos**, **V. Venkatasubramanian**, **V. Vittal**, Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks. Springer, N. Y., 2014.
- [14] **A.V. Mokeev**, **V.N. Bovykin**, **E.I. Khromtsov**, **A.V. Miklashevich**, **F.Y. Orlov**, **D.N. Ulyanov**, Intelligent Electronic Devices for Digital Substations 110(35)/6 KV, 5th International Scientific and Technical Conference Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation Sochi, 2015.
- [15] **A.V. Mokeev**, **V.N. Bovykin**, Intelligent devices for digital substations, The New in Russian Electric Power Industry, 4 (2015) 40–48.
- [16] **A.V. Mokeev**, **L.N. Perelygin**, **E.I. Khromtsov**, Combined 6–35 kV current and voltage transducers, The New in Russian Electric Power Industry, 1 (2017) 39–52.
- [17] **A.V. Soldatov**, **V.I. Antonov**, **V.A. Naumov**, **N.G. Ivanov**, **M.I. Aleksandrova**, Information base of protection for a generator from single-phase earth faults of the stator with monitoring of the higher harmonics of the differential current, Rel. Zashch. Avtomat, 3 (24) (2016) 12–20.

THE AUTHORS

POPOV Maksim G. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

VASILYEVA Olga A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: vasilieva_oa@spbstu.ru

ASAINOV Daniil N. – *National research university «Moscow power engineering institute»*

E-mail: AsainovDN@gmail.com

Received: 08.07.2019