# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3

#### Вадим Русланович Рафиков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры электрических систем, Россия, Иваново, email: vadim\_rafikov@mail.ru

#### Игорь Евгеньевич Иванов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем, Россия, Иваново, email: iivanov@mtu.edu

#### Александр Александрович Братолюбов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем, Россия, Иваново, email: bra2012@list.ru

## Физико-математическое моделирование переходных процессов в синхронном генераторе с применением синхронизированных векторных измерений

#### Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время предпринимаются попытки идентификации параметров синхронных генераторов на основе синхронизированных векторных измерений напряжений и токов, зафиксированных во время возмущений в энергосистеме. При этом отсутствуют комплексные исследования касательно скорости реакции реального векторного регистратора на возмущение, величины погрешности, а также фильтруемых компонентов переходного процесса. Целью работы является определение этих характеристик устройств векторных измерений при воспроизведении осциллограмм переходного процесса вследствие короткого замыкания статорной цепи генератора, полученных математическим моделированием.

**Материалы и методы.** Осциллограммы переходных процессов получены двумя способами – на основе полной системы уравнений Парка-Горева в записи через потокосцепления и посредством имитационного моделирования с использованием блока синхронной машины в среде MATLAB/Simulink. Эти осциллограммы затем использованы для физического моделирования – формирования векторов тока статорной цепи с применением комплекса RTDS и векторного регистратора ЭНИП-2 (PMU).

**Результаты.** Установлено, что регистраторы RTDS и ЭНИП-2 (PMU) практически полностью фильтруют апериодическую составляющую тока короткого замыкания и корректно воспроизводят процесс по периодической составляющей. Выявлено, что полная векторная погрешность при конфигурировании регистраторов по классу P, согласно IEEE C37.118, достигает 1–2 % спустя 0,02–0,03 с от начала короткого замыкания. Обосновывается, что векторные измерения во время возмущений в энергосистеме потенциально могут быть использованы для определения синхронных, переходных и сверхпереходных параметров генератора.

<sup>©</sup> Рафиков В.Р., Иванов И.Е., Братолюбов А.А., 2021 Вестник ИГЭУ, 2021, вып. 3, с. 22–32.

**Выводы.** Выбранная математическая модель синхронной машины в записи через потокосцепления корректна: осциллограммы переходного процесса полностью соответствуют полученным в среде Simulink. Для фиксации переходного процесса в статорной цепи генератора предпочтительно использовать векторные регистраторы класса Р. Результаты работы предполагается использовать для идентификации параметров машины с применением векторных измерений от RTDS, а затем и регистраторов на электростанциях.

Ключевые слова: синхронный генератор, идентификация параметров, синхронизированные векторные измерения, полная векторная погрешность, осциллограмма, переходный процесс

#### Vadim Ruslanovich Rafikov

Ivanovo State Power Engineering University, Master's student of the Department of Electric Power Systems, Russia, Ivanovo, email: vadim\_rafikov@mail.ru

#### Igor Evgenievich Ivanov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of the Department of Electric Power Systems, Russia, Ivanovo, email: iivanov@mtu.edu

#### Aleksandr Aleksandrovich Bratoliubov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Systems, Russia, Ivanovo, email: bra2012@list.ru

# Physical and mathematical modeling of transients in a synchronous generator utilizing synchronized phasor measurements

### Abstract

**Background.** There have been quite a few attempts to compute synchronous generator parameters based on voltage and current synchrophasors taken under power system transients. However, we have not seen any publications with thorough analysis as to how soon the phasor measurement unit reacts to disturbance conditions, which components of the transient are filtered out and which are passed through, as well as what the total vector error is. The goal of this research is to determine all of these characteristics of a phasor measurement unit when playing back transient oscillograms for a stator short circuit obtained through mathematical modeling.

**Materials and methods.** The transient oscillograms have been derived via both a full Park-Gorev system of flux linkage equations as well as the MATLAB/Simulink Synchronous Machine block. Physical modeling was then conducted via a real-time digital simulator (RTDS) along with a dedicated phasor measurement unit ENIP-2 (PMU), and the stator current phasors were recorded.

**Results.** Our analysis has shown that both RTDS and ENIP-2 (PMU) almost entirely filter out the exponentially decaying DC component of the fault current while closely following the periodical signal envelope. The total vector error has been estimated to become below 1–2 % after around 0,02–0,03 s into the fault when selecting the "P" class filters according to IEEE C37.118. We have come to a conclusion that synchrophasor measurements under power system disturbances could be utilized for estimating the synchronous, transient, and subtransient generator parameters.

**Conclusions.** The selected synchronous machine model in the form of flux linkage equations is correct, as the obtained transient oscillograms are exactly the same as those produced by Simulink. "P" class phasor measurements can be recommended for representing transients in the stator circuit of a synchronous generator. The results of this investigation are meant to be employed for synchronous machine parameter estimation based on phasors sourced from RTDS and, hopefully, from phasor measurement units installed at power plants.

**Key words:** synchronous generator, parameter estimation, synchronized phasor measurements, total vector error, oscillogram, transient

#### **DOI:** 10.17588/2072-2672.2021.3.022-032

Введение. Применение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) напряжений и токов потенциально позволяет решать множество актуальных задач электроэнергетики [1–3], повышая эффективность и надежность работы элек-

троэнергетических систем (ЭЭС). Одним из главных направлений применения СВИ является определение фактических параметров схем замещения элементов ЭЭС, а также анализ функционирования систем регулирования по реальным данным устано-

вившегося или переходного режима [4–7]. Мощные синхронные генераторы (СГ), являясь одними из важнейших элементов ЭЭС, оснащаются устройствами СВИ (УСВИ)<sup>1</sup>, что позволяет формировать выборку параметров электроэнергетического режима «в темпе процесса». УСВИ, установленный на СГ. обеспечивает расчет и передачу по каналам связи синхронизированных комплексных значений (векторов) напряжений и токов всех фаз статора с частотой 50 раз в секунду, и для тех же дискретных моментов времени фиксируются напряжение и ток возбуждения, а также частота тока в статорной цепи. Наличие подобного состава данных открывает перспективы точной оценки фактических характеристик контуров СГ (и в перспективе – автоматики регулирования возбуждения, а также частоты вращения турбины) и, соответственно, формирования уточненных расчетных схем замещения СГ. По сути, любое значительное возмущение в ЭЭС (например, вызванное так называемыми «небалансами» мощности), в которое вовлечен исследуемый СГ с УСВИ, позволяет провести пассивный эксперимент и попытаться определить некоторые сопротивления и постоянные времени для расчетной модели синхронной машины.

Идентификация синхронных сопротивлений турбо- и гидрогенераторов может быть выполнена по данным серии установившихся электроэнергетических режимов [8]. Однако для определения переходных и сверхпереходных сопротивлений, а также сопротивлений и постоянных времени обмотки возбуждения (ОВ) и демпферных контуров (ДК) генератора необходимо рассматривать переходные режимы в ЭЭС, возникающие в результате так называемых «больших» возмущений (короткие замыкания, отключения мощных энергоблоков и наиболее загруженных элементов ЭЭС). В этом случае необходимо применять полную систему уравнений, описывающую переходные процессы (ПП) во всех указанных контурах СГ, что неизбежно вызывает вопрос о достоверности уравнений.

Модель синхронной машины в виде уравнений Парка–Горева позволяет учесть

ПП в ОВ и ДК СГ. Однако конкретная форма записи уравнений различается в различных источниках<sup>2</sup> [9], в частности, из-за различной ориентации продольной и поперечной осей ротора d и q [10], относительно которых и осуществляется решение системы. Кроме того, в данной модели отсутствуют в явном виде переходные и сверхпереходные сопротивления СГ, всегда имеющиеся в полном паспорте синхронной машины (и, напротив, присутствуют сопротивления ДК и ОВ), что затрудняет верификацию модели. Наконец, в какой бы форме ни были записаны уравнения Парка–Горева, необходимо убедиться в корректности ее алгоритмизации в выбранном языке программирования. Очевидно, только после устранения ошибок можно создавать метод определения параметров СГ на базе СВИ с использованием этой модели, иначе зафиксированный физический процесс (напряжения и токи контуров СГ) будет некорректно связан с искомыми параметрами.

Верификация системы уравнений возможна с помощью признанных средств моделирования ПП в ЭЭС, например, MATLAB/Simulink/Simscape Power Systems, ATP/ATPDraw или PSCAD. В настоящей работе для этой задачи выбрана связка MATLAB/Simulink/Simscape Power Systems. Однако и здесь возникают нюансы: состав параметров, вводимых в модель Simscape Power Systems, не тождествен тому, что принято в отечественной литературе<sup>3</sup>, в связи с чем требуется процедура пересчета, например, на основе выражений из [9].

После того, как модель верифицирована, необходимо понять, каким образом УСВИ «видит» ПП в синхронной машине, а именно – какие компоненты ПП фильтруются, а какие пропускаются, и – что не менее важно – каковы скорость реакции УСВИ на поданное возмущение и время достижения приемлемой полной векторной погрешности. Только с учетом результатов подобного анализа можно впоследствии сформировать модель для идентификации параметров СГ с применением СВИ. Методы цифровой обработки сигналов, закладываемые в УСВИ, доста-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Стандарт организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.020.001-2019. «Релейная защита и автоматика. Системы мониторинга переходных режимов. Нормы и требования». Дата утверждения: 18.03.2019.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Фролов М.Ю. Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах электрической сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Новосибирск, 2018. – 124 с. <sup>3</sup> Там же.

точно сложны<sup>4</sup>. Вместо создания математической модели, имитирующей функционирование УСВИ, на наш взгляд, целесообразнее воспроизвести первичный процесс на реальном векторном регистраторе. Таким образом, осциллограммы, сформированные по верифицированной математической модели ПП в СГ, подаются затем на физическое устройство, т.е. осуществляется физикоматематическое моделирование, максимально приближенное к реальному практическому сценарию в ЭЭС.

С учетом изложенного выше поставлены следующие основные задачи:

• формирование корректной системы уравнений, отражающей электромагнитные ПП в контурах СГ, и ее верификация в MATLAB/Simulink;

• воспроизведение полученных осциллограмм ПП на реальных УСВИ с анализом скорости их реакции и точности выделения векторов.

Материалы и методы. Математическая модель для исследования переходных процессов в синхронном генераторе. Модель СГ, сформированная на основе полных уравнений Парка-Горева и учитывающая ПП в ОВ и ДК СГ по продольной и поперечной осям, достаточно точно воспроизводит электромагнитные переходные процессы в синхронной машине [9]. Эта система уравнений и выбрана нами в качестве рабочей модели, имитирующей ПП при «больших» возмущениях, не учитывающих изменения скорости вращения ротора СГ. Ниже рассматриваются уравнения системы и описываются входящие в них переменные.

Уравнения, описывающие переходные процессы в статорных цепях СГ:

$$U_d + r_a i_d + \rho \psi_d + \omega \psi_a = 0; \qquad (1)$$

 $u_q + r_a i_q + \rho \psi_q - \omega \psi_d = 0; \qquad (2)$ 

$$\psi_d = \mathbf{X}_d \, \mathbf{i}_d + \mathbf{X}_{ad} \, \mathbf{i}_f + \mathbf{X}_{1ad} \, \mathbf{i}_{1d}; \tag{3}$$

$$\psi_q = \mathbf{X}_q \, \mathbf{i}_q + \mathbf{X}_{1aq} \, \mathbf{i}_{1q} \,. \tag{4}$$

В выражениях (1)–(4) приняты следующие обозначения: *p* – оператор дифференцирования по времени в относительных единицах; *u<sub>d</sub>*, *u<sub>q</sub>* – проекции вектора напряжения на шинах СГ на продольную и попе-

речную оси вращающегося ротора соответственно; *i*<sub>d</sub>, *i*<sub>a</sub> – проекции вектора тока статора на продольную и поперечную оси соответственно;  $\psi_d$ ,  $\psi_q$  – потокосцепления статорной цепи по продольной и поперечной осям соответственно;  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$  – токи в ДК генератора, расположенных по продольной и поперечной осям; x<sub>d</sub>, x<sub>q</sub> - синхронные сопротивления СГ; *i*<sub>f</sub> – ток возбуждения; *x*<sub>ad</sub> – сопротивление реакции якоря; x<sub>1ad</sub>, x<sub>1aq</sub> – взаимоиндукция между контурами якоря и ДК по продольной и поперечной осям соответственно; r<sub>a</sub> – активное сопротивление статора; ш – угловая частота вращения ротора (если не рассматривать электромеханические ПП, принимается  $\omega = \text{const}$ ).

Следует отметить, что под «вектором» напряжения или тока, проекции которого на оси *d* и *q* ротора фигурируют в уравнениях (1)–(4), понимается так называемый «обобщенный вектор»<sup>5</sup>, учитывающий ПП как по периодической, так и по апериодической составляющей.

Уравнения, описывающие переходные процессы в обмотке возбуждения:

$$u_f = r_f i_f + \rho \psi_f; \tag{5}$$

$$\psi_f = X_f \, \dot{i}_f + X_{ad} \, \dot{i}_d + X_{1f} \, \dot{i}_{1d} \,, \tag{6}$$

где *u<sub>f</sub>* – напряжение возбуждения; *x<sub>f</sub>*, *r<sub>f</sub>* – реактивное и активное сопротивления ОВ соответственно; *ψ<sub>f</sub>* – потокосцепление OB; *x*<sub>1f</sub> – взаимоиндукция между OB и ДК по продольной оси.

Уравнения, описывающие переходные процессы в демпферных контурах:

$$r_{1d} i_{1d} + \rho \psi_{1d} = 0; \qquad (7)$$

$$r_{1q} i_{1q} + p \psi_{1q} = 0; \qquad (8)$$

$$\psi_{1d} = \mathbf{x}_{1d} \, \dot{\mathbf{i}}_{1d} + \mathbf{x}_{1f} \, \dot{\mathbf{i}}_f + \mathbf{x}_{1ad} \, \dot{\mathbf{i}}_d \, ; \tag{9}$$

$$\psi_{1q} = \mathbf{X}_{1q} \, \mathbf{i}_{1q} + \mathbf{X}_{1aq} \, \mathbf{i}_{q} \,. \tag{10}$$

В выражениях (7)–(10) приняты следующие обозначения (в дополнение к описанным выше): *r*<sub>1*d*</sub>, *r*<sub>1*q*</sub> – активные сопротивления ДК по продольной и поперечной осям соответственно; *x*<sub>1*d*</sub>, *x*<sub>1*q*</sub> – аналогичные реактивные сопротивления ДК; *ψ*<sub>1*d*</sub>, *ψ*<sub>1*q*</sub> – потокосцепления ДК по продольной и поперечной осям соответственно.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Std. C37.118.1-2011. – New York, USA: IEEE, 2011.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Фролов М.Ю. Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах электрической сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Новосибирск, 2018. – 124 с.

Сформированная система алгебродифференциальных уравнений (1)–(10) реализована в виде m-файла в среде математического моделирования МАТLAB. Для решения подобной гибридной системы применяется встроенная в МАТLAB функция ode15s [11], осуществляющая интегрирование с переменным шагом. Полученные проекции статорных токов по осям *d* и *q* ротора СГ используются для получения мгновенных значений токов фаз статора через специальную матрицу преобразования<sup>6</sup>.

Имитационная модель для верификации системы уравнений. В целях подтверждения возможности использования вышеприведенной системы vравнений (1)-(10) для исследования ПП в СГ, возникающих в результате «больших» возмущений, необходимо ее верифицировать. В качестве возмущения рассматривается трехфазное короткое замыкание (КЗ) на выводах статорной обмотки СГ, возникающее из режима холостого хода, при неизменном напряжении возбуждения во время всего ПП. Осциллограммы напряжений и токов, полученные по (1)-(10), сравниваются с соответствующими сигналами, рассчитанными путем имитационного моделирования в Simulink/Simscape Power Systems (рис. 1). При совпадении осциллограмм (их полном наложении друг на друга), полученных двумя способами, делается вывод о корректной реализации алгебро-дифференциальных уравнений (1)-(10) и, следовательно, о возможности применения этих уравнений для идентификации параметров СГ на основе векторных измерений.



Рис. 1. Имитационная модель в MATLAB/Simulink/Simscape Power Systems для верификации системы уравнений (1)–(10)

Модель СГ в Simulink (рис. 1) имеет следующие особенности, которые важно учесть при моделировании.

1. Ток возбуждения СГ будет отличаться в 1/*x<sub>ad</sub>* раз от рассчитываемого по (1)–(10). Это обусловлено различным определением «номинального тока возбуждения» в отечественных материалах по теме и в справочном сопровождении модели СГ в Simulink.

2. Активные и реактивные сопротивления, задаваемые в используемой модели СГ Synchronous Machine pu Fundamental, отличаются от параметров, образующих систему (1)–(10), поэтому требуется пересчет одних переменных в другие (в данном случае он был выполнен по выражениям из [9]).

Физико-математическое моделирование векторной регистрации полученного переходного процесса. Основной задачей исследования, как отмечено выше, является анализ реакции УСВИ на полученный ПП, осциллограммы которого верифицированы с помощью Simulink/Simscape Power Systems. Иными словами, необходимо понять, какие вектора статорных токов были бы зафиксированы УСВИ, если бы мы имели возможность регистрации полученного процесса на реальном энергообъекте. В силу сложности алгоритмов формирования СВИ и, соответственно, имитации функционирования УСВИ, наиболее целесообразным вариантом представляется подача сформированных осциллограмм токов фаз статора на реальное УСВИ. Повозможность добная обеспечивается имеющимся в ИГЭУ оборудованием, способным формировать синхронизированные вектора по IEEE C37.118, - программно-аппаратным комплексом моделирования в реальном времени RTDS [12], а также устройством ЭНИП-2 (PMU)<sup>7</sup>. Более того, оба устройства позволяют сконфигурировать их и по классу М, и по классу Р (в соответствии с IEEE C37.118 и аналогичным отечественным стандартом<sup>8</sup>),

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Фролов М.Ю. Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах электрической сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Новосибирск, 2018. – 124 с.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Преобразователь измерительный многофункциональный ЭНИП-2. Руководство по эксплуатации. ЭНИП.411187.002 РЭ. Ред 05.2021. – Архангельск: Инженерный центр «Энергосервис», 2021.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Стандарт организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.020.011-2016. «Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования». Дата утверждения: 20.03.2017.

что придает исследованию дополнительную функциональность.

Главные вопросв, которые необходимо получить в результате «проигрывания» осциллограмм ПП, сводятся к следующему:

• каким образом реальное УСВИ «видит» ПП при трехфазном КЗ на выводах статора СГ с учетом содержания свободной апериодической составляющей в статорном токе синхронной машины;

• насколько быстро уменьшается полная векторная погрешность (total vector error, или TVE, по IEEE C37.118) с течением времени от момента K3;

• насколько велика разница между УСВИ классов М и Р в части скорости реакции на ПП и обеспечиваемой TVE.

Устройство векторных измерений должно корректно выделять первую гармонику сигнала тока (напряжения) и отфильтровывать свободную апериодическую и высшие гармонические составляющие. При этом учитывается изменение частоты основной гармоники сигнала. В нашем случае воспроизводится электромагнитный ПП на частоте 50 Гц. следовательно, фазовый угол вектора тока по IEEE C37.118 изменяться не должен. Поэтому условимся определить этот фазовый угол на метку времени t = 0, соответствующую моменту возникновения КЗ. Кроме того, поскольку все осциллограммы подаются на RTDS и ЭНИП-2 (PMU) без GPS-синхронизации или иного триггера, аварийный ПП дополняется доаварийным процессом в виде двух «чистых» синусоидальных сигналов общей длительностью 2 с (рис. 2). Это позволяет практически точно совместить «эталонные» и измеренные вектора, чтобы рассчитать погрешности TVE по каждому измерению.

Результаты. Математическое моделирование трехфазного КЗ на выводах статора СГ. Для получения осциллограмм ПП на базе выражений (1)-(10) рассмотрена модель гидрогенератора со следующими паспортными данными (в относительных единицах при базисных напряжении и мощности, равных соответствующим номинальным величинам):  $x_d = 0,558; \ x_q = 0,379; \ x_d^{'} = 0,21; \ x_d^{'} = 0,162;$  $x_{a}^{"}=0,163;$   $x_{f}=0,641;$  $X_{1d} = 0,667;$  $x_{1q} = 0,398$ ;  $x_{1aq} = 0,293$ ;  $r_a = 0,00353$ ;  $r_f = 0,000362;$   $r_{1d} = 0,0105;$   $r_{1q} = 0,0083;$  $x_{ad} = x_{1ad} = x_{1f} = 0,472$ . Напряжение на ОВ неизменно и задается из условия обеспечения единичного напряжения на выводах СГ на холостом ходу, т.е. непосредственно до КЗ.



Рис. 2. Осциллограммы статорных токов синхронной машины, подаваемые на УСВИ для получения векторных измерений (доаварийный процесс в течение первых двух секунд, сменяемый осциллограммами ПП при трехфазном КЗ на выводах статора СГ)

Общий вид ПП по статорным токам отражен на осциллограммах рис. 2, начиная с 2 с по оси абсцисс. Наиболее выраженная свободная апериодическая составляющая имеет место в фазе А. В целом же общий характер ПП определяется суперпозицией ПП в различных контурах синхронной машины. Можно выделить отдельные составляющие общего ПП (рис. 3), что достигается различными допущениями, применяемыми к строгим соотношениям (1)–(10). Анализ полученных данных (рис. 2, 3) показывает, что при таком «большом» возмущении, как рассматриваемое трехфазное КЗ на выводах обмотки статора, происходят значительные изменения не только апериодической, но и периодической составляющей статорного тока.

Верификация полученных осциллограмм ПП осуществлена посредством имитационного моделирования в Simulink/Simscape Power Systems (рис. 1), как описано выше. В результате получилось практически идеальное совпадение всех расчетных по (1)-(10) кривых с соответствуосциллограммами юшими по модели Synchronous Machine pu Fundamental в Simulink. На рис. 4, 5 в качестве доказательства представлено сопоставление составляющих статорных токов (*i*<sub>d</sub> и *i*<sub>q</sub>), а также токов ОВ  $(i_f)$  и ДК  $(i_{1d}$  и  $i_{1g})$ . Таким образом, можно сделать вывод о корректности сформированной расчетной модели (1)-(10), а также о ее безошибочной реализации в виде алгоритма на языке MATLAB. Остается выяснить, каким образом данный ПП воспринимается векторным регистратором.



Рис. 3. Осциллограмма тока фазы A, отражающая вид переходного процесса при трехфазном K3 на выводах статора CГ при различной степени детализации моделирования ПП в отдельных контурах CГ (обмотка статора, OB, ДК)



Рис. 4. Сопоставление осциллограмм статорных токов (id и iq) и токов OB (if) по двум расчетным моделям – собственной на языке MATLAB, реализованной по уравнениям (1)–(10), и модели CГ в Simulink/Simscape Power Systems



Рис. 5. Сопоставление осциллограмм токов ДК СГ по двум расчетным моделям – собственной на языке MATLAB, реализованной по уравнениям (1)–(10), и модели СГ в Simulink/Simscape Power Systems

Физико-математическое моделирование для получения СВИ токов рассматриваемого ПП. Для того чтобы совершенствовать методы определения фактических параметров СГ с использованием СВИ напряжений и токов, необходимо четко понимать, каким образом УСВИ реагирует на ПП, вызванный «большим» возмущением (таким как рассмотренное выше трехфазное КЗ). Точная имитация алгоритма функционирования УСВИ достаточно сложна, в связи с чем наиболее корректные выводы могут быть сделаны только при «проигрывании» осциллограмм ПП на реальном УСВИ.

Анализ данных (рис. 2, 3) показывает, что рассматриваемый ПП характеризуется значительной по величине свободной апериодической составляющей статорного тока, а также существенно изменяющейся во времени периодической составляющей тока (что характерно для КЗ, электрически близких к шинам генераторного напряжения электростанций, вследствие выраженных ПП в синхронной машине). Вместе с тем логика векторных измерений позволяет предположить, что апериодическая компонента тока должна отфильтровываться УСВИ, а процесс по составляющей периодической должен воспроизводиться точно, т.е. модуль рассчитанного вектора тока в каждый момент времени должен соответствовать огибающей действующего значения синусоидального сигнала (рис. 6).



Рис. 6. Сверхпереходный ток фазы A статора СГ и огибающие его амплитудных (сплошная кривая) и действующих значений (пунктирная кривая)

Об этом же свидетельствуют результаты предварительного математического моделирования векторной регистрации статорного тока (рис. 7): применение прямоугольного окна дискретного преобразования Фурье (ДПФ) порождает осцилляции рассчитанного модуля тока вокруг «эталона», отражающего изменение огибающей сверхпереходного тока. Быстрое уменьшение этого тока приводит (рис. 7) к большой погрешности ДПФ. В реальном УСВИ прямоугольное окно ДПФ заменяется более сложными алгоритмами цифровой обработки сигнала, поэтому представляет интерес получение аналогичного векторного представления аварийных токов статора посредством регистраторов RTDS и ЭНИП-2

(PMU), имеющихся в ИГЭУ. При этом важно оценить не только точность измерений, но и скорость выхода на некоторое «установившееся» значение погрешности, особенно с учетом возможности параметрирования обоих УСВИ по классам М и Р согласно IEEE C37.118.



Рис. 7. Огибающая действующих значений статорного тока: «эталонная» (пунктирная кривая) и рассчитанная с помощью прямоугольного окна ДПФ (сплошная кривая)

На рис. 8 та же «эталонная» огибающая тока, представленная пунктирной линии на рис. 7, показана в сравнении с расчетными величинами действующих значений токов, измеренных УСВИ, задействованными в ходе эксперимента. При этом устройство ЭНИП-2 (РМU) параметрировалось только по классу Р, а векторный измеритель, имеющийся в RTDS, конфигурировался как по классу М, так и по классу Р согласно IEEE С37.118. Таким образом, было проведено три отдельных эксперимента, в которых воспроизводился один и тот же ПП.

Визуальной разницы между четырьмя огибающими сверхпереходного тока КЗ («эталонной» и тремя измеренными) на рис. 8 не прослеживается. Данный факт свидетельствует о том, что в реальном УСВИ действительно реализованы более сложные алгоритмы цифровой фильтрации сигнала, чем стандартное прямоугольное окно ДПФ, результат применения которого приведен на рис. 7. Кроме того, УСВИ реагирует именно на сверхпереходный ток КЗ, фактически полностью фильтруя значительную по величине свободную апериодическую составляющую, отраженную на рис. 2 с начала третьей секунды моделирования (что соответствует нулевой отметке времени – моменту КЗ – на рис. 6–8).



Рис. 8. Результат фиксации действующего значения тока фазы А статора СГ реальными УСВИ в сравнении с «эталоном»

Детальный анализ небольшого интервала времени, соответствующего началу ПП, позволяет увидеть некоторое различие между четырьмя кривыми (рис. 9), однако и общий тренд, и отдельные точки данных практически идентичны во всех экспериментах.



Рис. 9. Сравнение измерений действующего значения тока фазы А статора СГ с «эталонными» данными в течение интервала времени, соответствующего началу ПП

Для оценки погрешности измерений должна учитываться также информации о разности фаз «эталона» и вектора, зафиксированного УСВИ, что обеспечивается расчетом полной векторной погрешности по каждой точке данных – модуля векторной разности «эталонного» и рассчитанного векторов по отношению к модулю «эталонного» вектора (по IEEE C37.118). На рис. 10 приведены значения полной векторной погрешности по статорному току фазы В, а на рис. 11 представлена детализированная версия того же графика, содержащая изменения погрешностей на интервале до 0,5 с от момента возникновения КЗ.

Анализ данных рис. 10 показывает, что полная векторная погрешность в целом не превышает 1,5 %, вне зависимости от типа УСВИ и от параметрирования его по классу Р или М. Подобная картина характерна и для токов фаз А и С. Это можно считать вполне приемлемой величиной ошибки СВИ, сопровождающей быстротекущий электромагнитный ПП, такой как рассматриваемое трехфазное КЗ.



Рис. 10. Изменение полной векторной погрешности при воспроизведении осциллограммы тока фазы В статора СГ на реальных УСВИ



Рис. 11. Изменение полной векторной погрешности при «проигрывании» осциллограммы тока фазы В статора СГ на реальных УСВИ в течение 0,5 с от начала КЗ

Что касается скорости реакции фильтра на резкое изменение сигнала во время КЗ, то анализ данных рис. 11 показывает, что к моменту времени 0,05 с погрешности всех без исключения УСВИ укладываются в 2.5 %. Самым запаздывающим является УСВИ класса М, что вполне ожидаемо. Более комплексная картина динамики погрешностей в самом начале ПП приведена на рис. 12 (столбцы данных слева направо следуют в том порядке, как отражено в легенде графика). Анализ представленных данных показывает, что уже спустя 0,03 с (1,5 периода промышленной частоты) от начала КЗ все без исключения погрешности не превышают 3 %. При этом для УСВИ, сконфигурированных по классу Р, величина погрешности находится в районе 1-2 % даже для момента времени 0,02 с. Анализ данных рис. 3 и 5 показывает, что при этом открываются перспективы учета ПП в ДК генератора, т.е. идентификации сверхпереходных параметров синхронной машины на базе СВИ, зафиксированных при «больших» возмущениях.



Рис. 12. Полные векторные погрешности регистрации статорных токов всех фаз на моменты времени 0,02–0,05 с от начала ПП

**Выводы.** По результатам выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно заключить следующее.

1. ПП в синхронной машине, рассчитанный по системе уравнений (1)–(10), в точности соответствует ПП, полученному с применением модели Synchronous Machine pu Fundamental в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink/Simscape Power Systems. Таким образом, система (1)–(10) потенциально может быть использована для идентификации параметров СГ на основе измерений во время ПП, соответствующего «большому» возмущению.

 УСВИ фильтрует свободную апериодическую составляющую тока КЗ и корректно воспроизводит процесс по периодической составляющей даже при быстром изменении ее амплитуды (рассматривалась огибающая сверхпереходного тока КЗ).

3. УСВИ класса Р способны обеспечить полную векторную погрешность на уровне 1–2 % уже спустя 0,02 с от начала электромагнитного ПП, что благоприятствует решению задачи идентификации сверхпереходных параметров синхронной машины на основе СВИ.

Дальнейшее направление исследований предполагает получение более комплексных выводов при воспроизведении других ПП и наличии точной GPSсинхронизации, а также применение полученных векторов для определения сопротивлений и постоянных времени различных контуров СГ.

#### Список литературы

1. Дубинин Д.М., Жуков А.В. Развитие технологии синхронизированных векторных из-

мерений в ЕЭС России // Цифровая подстанция. – 2017. – № 8. – С. 24–33.

2. **Measurements** get together / S. Chakrabarti, E. Kyriakides, T. Bi, et al. // IEEE Power and Energy Magazine, Jan.-Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid-Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES. – P. 15–23.

3. Schweitzer III E.O., Whitehead D.E. Real-World Synchrophasor Solutions // SEL Journal of Reliable Power. – May 2011. – Vol. 2, no. 2.

4. Liao Y., Kezunovic M. Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications // IEEE Trans. Power Delivery. – January 2009. – Vol. 24, no. 1. – P. 96–102.

5. **PMU** Based Generator Parameter Identification to Improve the System Planning and Operation / C.-C. Tsai, W.-J. Lee, E. Nashavati, C.-C. Wu, H.-W. Lan // IEEE Power and Energy Society General Meeting. – San Diego, CA, USA, July 22–26, 2012.

6. Жуков Д.А., Бердин А.С., Близнюк Д.И. Применение данных синхронизированных векторных измерений для мониторинга технического состояния гидрогенераторов // Релейщик. – 2019. – № 3. – С. 38–42.

7. Николаева О.О., Климова Т.Г., Максимов Б.К. Актуализация параметров АРВ с использованием данных СВИ // Международная конференция «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017». Санкт-Петербург, Россия, 2017. – СПб., 2017.

8. Рафиков В.Р., Иванов И.Е., Братолюбов А.А. Разработка методов идентификации параметров синхронного генератора по синхронизированным векторным измерениям в установившемся режиме // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI междунар. науч.-техн. конф. – Ставрополь: СКФУ, 2020. – С. 319–323.

9. **Kundur P.** Power System Stability and Control. – New York: McGraw-Hill, 1994.

10. **Dommel H.W.** Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. – Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.

11. Shampine L.F., Reichelt M.W., Kierzenka J.A. Solving Index-1 DAEs in MATLAB and Simulink // SIAM Review. – 1999. – Vol. 41. – P. 538–552.

12. Сидвол К., Иванов Ф.А. Новые возможности моделирования энергосистем в реальном времени // Энергия единой сети. – 2019. – № 4. – С. 22–30.

### References

1. Dubinin, D.M., Zhukov, A.V. Razvitie tekhnologii sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy v EES Rossii [Development of the technology of synchronized phasor measurements in the Rissian UPS]. *Tsifrovaya podstantsiya*, 2017, no. 8, pp. 24–33. (In Russian) 2. Chakrabarti, S., Kyriakides, E., Bi, T., Cai, D., Terzija, V. Measurements get together. IEEE Power and Energy Magazine, Jan.-Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid-Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES, pp. 15–23.

3. Schweitzer III, E.O., Whitehead, D.E. Real-World Synchrophasor Solutions. *SEL Journal of Reliable Power*, May 2011, vol. 2, no. 2.

4. Liao, Y., Kezunovic, M. Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications. *IEEE Trans. Power Delivery*, January 2009, vol. 24, no. 1, pp. 96–102.

5. Tsai, C.-C., Lee, W.-J., Nashavati, E., Wu, C.-C., Lan, H.-W. PMU Based Generator Parameter Identification to Improve the System Planning and Operation. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. San Diego, CA, USA, July 22–26, 2012.

6. Zhukov, D.A., Berdin, A.S., Bliznyuk, D.I. Primenenie dannykh sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy dlya monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya gidrogeneratorov [Application of synchronized phasor measurement data for monitoring the technical status of hydrogenerators]. *Releyshchik*, 2019, no. 3, pp. 38–42. (In Russian)

7. Nikolaeva, O.O., Klimova, T.G., Maksimov, B.K. Aktualizatsiya parametrov ARV s ispol'zovaniem dannykh SVI [Identification of automatic voltage regulator parameters using synchrophasor data]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem 2017»* [International conference "Relay protection and automation of electric power systems 2017"]. – Saint-Petersburg, 2017. (In Russian)

8. Rafikov, V.R., Ivanov, I.E., Bratolyubov, A.A. Razrabotka metodov identifikatsii parametrov sinkhronnogo generatora po sinkhronizirovannym vektornym izmereniyam v ustanovivshemsya rezhime [Development of synchronous generator parameter estimation methods based on synchrophasor measurements in a steady state]. *Materialy XI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»* [Materials of the XI international scientific and technical conference «Electric power industry through the eyes of youth»]. Stavropol': SKFU, 2020, pp. 319–323. (In Russian)

9. Kundur, P. Power System Stability and Control. New York, McGraw-Hill, 1994.

10. Dommel, H.W. Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.

11. Shampine, L.F., Reichelt, M.W., Kierzenka, J.A. Solving Index-1 DAEs in MATLAB and Simulink. *SIAM Review*, 1999, vol. 41, pp. 538–552.

12. Sidvol, K., Ivanov, F.A. Novye vozmozhnosti modelirovaniya energosistem v real'nom vremeni [New opportunities for electric power system modeling in real time]. *Energiya edinoy seti*, 2019, no. 4, pp. 22–30. (In Russian)