



УДК621.311.68

**О.А. Бурмакин**, к.т.н. доцент, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
**Ю.С. Малышев**, к.т.н. доцент, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
**С.В. Попов**, к.т.н. доцент, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
**М.П. Шилов**, аспирант, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
603951 Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

## ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ СЭЭСВ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

*Ключевые слова:* судовая электростанция, имитационная модель, синхронизация, параллельная работа, адекватность модели.

*В статье приведены результаты измерения параметров судовой электростанции и расчетов имитационного моделирования, позволяющего исследовать процессы, происходящие в судовой электроэнергетической системе. Выполнена оценка адекватности модели путем сравнения результатов моделирования и натурных испытаний. Показаны осциллограммы испытаний и результаты моделирования в различных режимах ее работы.*

Развитие современных средств моделирования позволяет создавать достаточно сложные структурные функциональные схемы различных устройств и объектов, в частности судовых автоматизированных электроэнергетических систем. На кафедре Э и ЭОВТ ВГУВТ в 2016 г была разработана модель судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) на базе двух дизель-генераторных агрегатов (ДГА), подробное описание и результаты моделирования которой, были опубликованы в статье вестника ВГАВТ [1].

Разработанная модель судовой станции выполнена в приложении Matlab Simulink и позволяет изучать динамические процессы, происходящие в СЭЭС при изменении нагрузки, синхронизации и параллельной работе двух дизель-генераторов.

Для оценки адекватности модели электростанции было выполнено сравнение результатов измерений электрических параметров реальной электростанции и результатов моделирования.

За объект исследования была принята электростанция теплохода проекта 588, состоящая из четырех дизель-генераторов, мощностью по 100 кВт каждый, и позволяющая выполнить синхронизацию, загрузку и разгрузку генераторов, как в ручном, так и в автоматическом режимах.

В качестве измерительного прибора был использован цифровой осциллограф DSO-2090, внешний вид которого показан на рис. 1. Цифровые средства измерения, по сравнению с аналоговыми, позволяют записывать измеренную информацию для ее последующего детального рассмотрения. Осциллограф имеет два канала измерения с максимальным напряжением до 1000 В с полосой пропускания 40 МГц. Широкий диапазон изменения интервалов времени от 4 нс до 1 ч позволяет отображать сигналы как кратковременных переходных процессов, так и продолжительной длительности. Кроме того, такой измерительный прибор позволяет выполнять математические операции с

входными сигналами (сложение, вычитание, умножение, быстрые преобразования Фурье) и отображать результат в реальном времени.

Для приближения модели к реальной, в нее были внесены каталожные данные генераторов, установленных на судне. Системы регулирования скорости вращения дизелей и напряжения генераторов реализованы в виде передаточных функций, имеющие коэффициенты и постоянные времени соизмеримые с параметрами действующего оборудования.

Натурные испытания проводились в следующих режимах: при отдельной работе двух генераторов, при процессе синхронизации и при их параллельной работе. Для определения реакции судовой электростанции на изменение нагрузки было выполнено подключение потребителей с суммарной мощностью 15 и 30 кВА и коэффициентом мощности  $\cos\varphi = 0,8$ .



Рис. 1. Внешний вид цифрового осциллографа DSO-2090

Для наглядности, на рис. 2, а приведена лицевая панель цифрового осциллографа, на которой показана область отображения сигналов и элементы управления временных и амплитудных параметров.

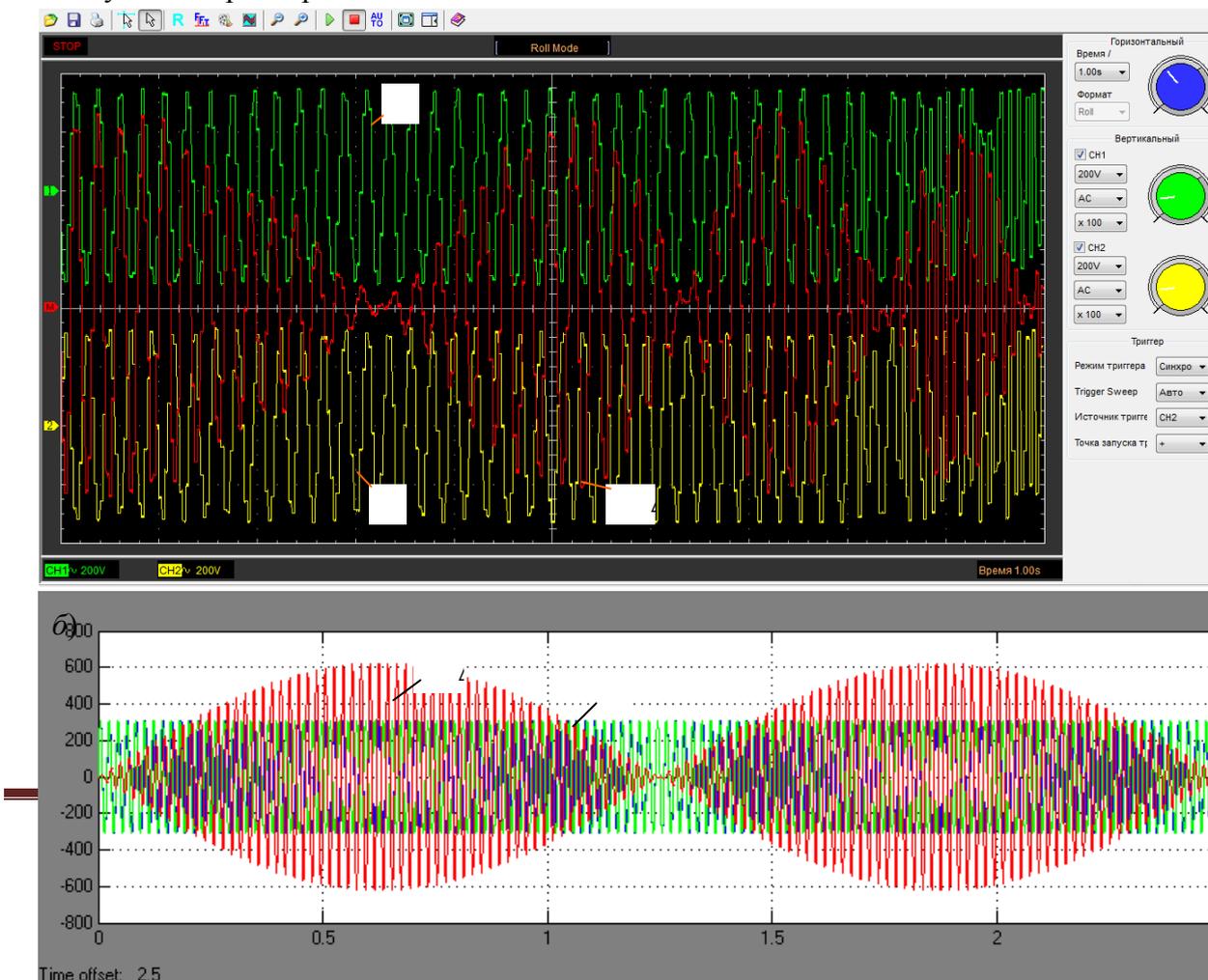


Рис. 2. Осциллограммы напряжений  $U_1$  и  $U_2$  генераторов и разности этих напряжений  $\Delta U$ : а) при натуральных испытаниях; б) в результате моделирования.

На экране показан размах напряжений  $U_1$  и  $U_2$  первого и второго генератора соответственно. Генераторы работают раздельно и приблизительно на равных частотах. Так же на экране показан сигнал разности напряжений  $\Delta U$  одноименных фаз генераторов, с некоторой частотой биений.

Подобные процессы были получены при имитационном моделировании. На рис. 2, б показаны напряжения  $U_1$  и  $U_2$  генераторов, совмещенных по оси времени, и напряжение  $\Delta U$ , которое имеет меньшую частоту биений, чем при испытаниях.

В процессе синхронизации двух генераторов выполняется подстройка частоты напряжения подключаемого генератора к частоте напряжения генератора, подключенного к шинам ГРЩ (рис. 3). При этом, наблюдается снижение амплитуды разности фазных напряжений  $\Delta U$ , по мере сближения частот генераторов. В момент выполнения всех условий синхронизации, когда  $\Delta U=0$ , производится включение генераторного автомата. В результате (рис. 3), напряжения генераторов имеют равную амплитуду и частоту, а сами дизель-генераторные агрегаты работают синхронно.

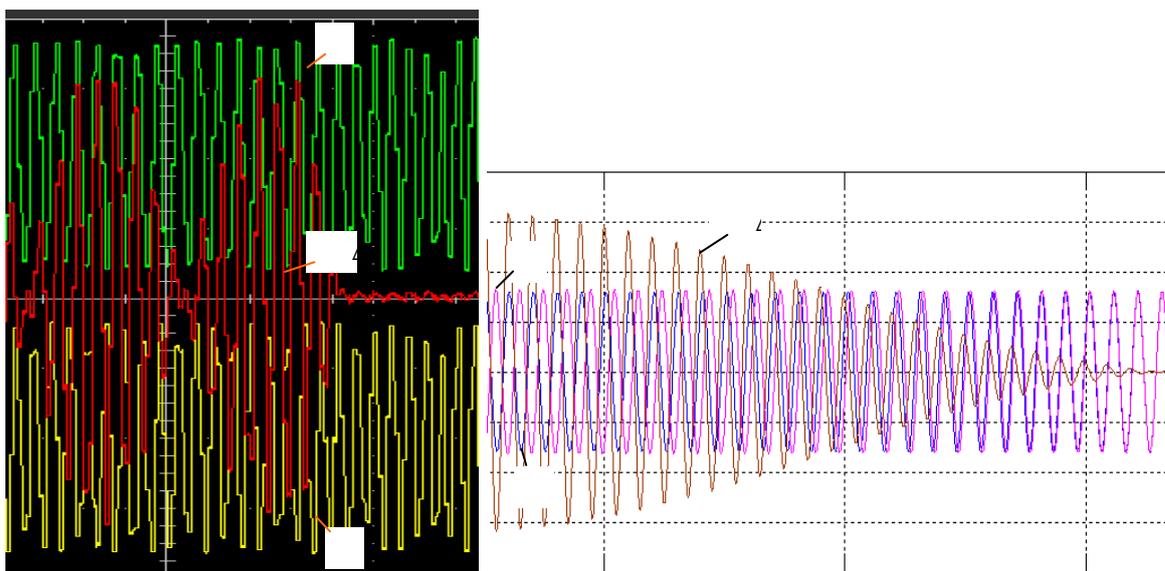


Рис. 3. Осциллограммы напряжений процесса синхронизации при натуральных испытаниях (слева) и в результате моделирования (справа).

Описанные процессы имеют общий характер, как на осциллограммах (рис. 3 слева), так и на диаграмме моделирования (рис. 3, справа).

Сравнительный анализ результатов моделирования и натуральных испытаний выявил следующее:

- 1) Формы кривых переходных процессов полученные при моделировании подобны эмпирическим;
- 2) Модель адекватно реагирует на изменение возмущающих воздействий (при набросе и сбросе нагрузки) – (в статье не приведены);
- 3) В процессе измерений параметров реальной электростанции наблюдаются наводки и искажения сигналов, которые являются следствием воздействия силового

электрооборудования ГРЩ на органы измерения, что не влияет на общую оценку переходных процессов.

Предложенная модель позволяет определять параметры электростанции с погрешностью 10-15 %, что связано, преимущественно, с подключением нагрузки, имеющей фиксированный коэффициент мощности, в отличие от натурных испытаний.

Экспериментальное исследование, в сравнении с компьютерным моделированием реальных процессов электростанции, не позволяет выполнить детальное рассмотрение сверхпереходных процессов, поэтому дальнейшая работа по совершенствованию модели является целесообразной.

#### **Список литературы:**

[1]. Имитационная модель судовой электростанции / О.А. Бурмакин, М.П. Шилов, Ю.С. Малышев, С.В. Попов/ Нижний Новгород, Вестник ВГАВТ.- 2016.- №48.- С.272-279 2016.- №48.- С.272-279.

### **EVALUATION OF THE ADEQUACY OF THE MODEL OF SHIP ELECTRIC POWER SYSTEM IN TRANSITIONAL MODES OF WORK**

O.A. Burmakin, Y.S. Malyshev, S.V. Popov, M.P. Shilov

*Keywords: ship power plant, simulation model, synchronization, parallel operation, adequacy of the model.*

*The article shows the results of measuring the parameters of the ship power station and the calculations simulation, which allows to investigate the processes occurring in the ship electric power system. The evaluation of the adequacy of the model by comparing simulation results and field tests. Oscillograms of tests and simulation of the operation of the power plant in different modes of operation are given.*