

И.М. Гвоздева, В.В. Демиров

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
ПРИ АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ОДНОГО
ИЗ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

Аннотация. В работе исследованы динамические процессы в автономной электроэнергетической системе, которые возникают при переходе одного из параллельно работающих генераторов в асинхронный режим в результате потери питания обмотки возбуждения. Для создания математических моделей процессов в синхронных генераторах использованы известные уравнения Парка-Горева. Решена задача имитационного моделирования динамических процессов в электроэнергетической системе контейнеровоза MSC Jарап, получены временные зависимости токов статоров, активных и реактивных мощностей синхронных генераторов. Предложены меры по устранению нежелательных последствий рассмотренной аварийной ситуации.

Ключевые слова: асинхронный режим, автономная электроэнергетическая система, синхронный генератор, имитационное моделирование, динамический процесс.

Введение. Основным источником электроэнергии в автономных электроэнергетических системах (АЭЭС) являются синхронные генераторы (СГ). Одним из аварийных режимов параллельной работы генераторов в составе АЭЭС является переход одного из них в асинхронный режим работы. Информация о физических величинах, характеризующих динамические процессы при переходе СГ в асинхронный режим, необходима для диагностики аварийного состояния АЭЭС и выполнения необходимых действий по его устранению.

Асинхронный режим работы СГ возникает в случае потери питания обмотки возбуждения в результате каких-либо неисправностей в системе возбуждения либо в результате коротких замыканий в сети. Переход СГ в асинхронный режим вызывает колебания активной и реактивной мощностей, при которых ток статора в несколько раз превышает номинальный, за счет чего при продолжительном асин-

хронном режиме происходит повышенный нагрев статора и ротора, что может привести к аварийной ситуации. Поэтому исследование динамических процессов в АЭЭС при переходе одного из генераторов в асинхронный режим имеет существенное теоретическое и практическое значение.

Основная часть. Предметом исследования являются математические и компьютерные модели динамических процессов в автономной электроэнергетической системе в условиях асинхронного режима работы одного из синхронных генераторов.

Особенности асинхронного режима работы СГ в составе наземной электроэнергетической системы, его характеристики, причины возникновения, способы выявления рассмотрены в [1,2]. Работы [3,4] посвящены особенностям эксплуатации судовых электроэнергетических систем (СЭЭС), в том числе автоматизированных, и их элементов. В [5] рассмотрены причины опасности асинхронного режима СГ. Работы [6,7] посвящены построению компьютерных моделей, позволяющих исследовать переходные процессы в СЭЭС с параллельно работающими генераторами. Несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных рассмотрению асинхронного режима работы СГ в составе наземных, в том числе тепловых, электроэнергетических систем, проблема распознавания и предотвращения указанного режима в автономных, в том числе судовых электроэнергетических системах, еще далека от полного решения. Поэтому задача моделирования динамических процессов в СЭЭС при выпадении одного из СГ из синхронизма с учетом конфигурации конкретной СЭЭС является актуальной.

Целью настоящей работы является исследование динамических процессов, возникающих при асинхронном режиме работы одного из синхронных генераторов в составе судовой электроэнергетической системы.

Асинхронный режим в СЭЭС является одним из самых сложных аварийных режимов, при котором возможно повреждение оборудования, нарушение электроснабжения потребителей и нежелательное развитие аварийного процесса с возможными тяжелыми последствиями для электроэнергетических объектов [8].

Процесс перехода СГ в асинхронный режим происходит в следующей последовательности: при исчезновении или значительном

уменьшении тока в обмотке возбуждения генератора уменьшаются магнитный поток возбуждения и соответствующий ему синхронный электромагнитный момент на валу генератора. При некотором значении тока возбуждения значение синхронного электромагнитного момента становится меньше вращающего момента дизеля и генератор, продолжая оставаться в сети, выпадает из синхронизма. Для поддержания магнитного поля генератор начинает потреблять намагничивающий ток из сети. Вследствие нарушения равновесия между вращающим моментом дизеля и электромагнитным (тормозным) моментом генератора начинает увеличиваться частота вращения агрегата выше синхронной. Увеличение частоты вращения агрегата приводит к тому, что ротор генератора вращается быстрее, чем магнитное поле статора, и в роторных контурах возникают переменные токи, имеющие частоту скольжения s_f . Взаимодействие наведенных в контурах ротора токов с основным потоком статора создает асинхронный электромагнитный момент на валу генератора, тормозящий ротор [3].

Математическое моделирование динамических процессов, возникающих при параллельной работе синхронных генераторов в составе СЭЭС осуществляется на основе уравнений Парка-Горева (УПГ) следующего вида [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p\psi_d = u_d + (1 + s) \cdot \psi_q - R_s \cdot i_d \\ p\psi_q = u_q + (1 + s) \cdot \psi_d - R_s \cdot i_q \\ p\psi_f = u_f - R_f \cdot i_f \\ p\psi_{Dd} = -R_{Dd} \cdot i_{Dd} \\ p\psi_{Dq} = -R_{Dq} \cdot i_{Dq} \\ ps = [M_{ДИЗ} - (i_d \cdot \psi_q - i_q \cdot \psi_d)] / T_j \\ p\theta = s \end{array} \right. \quad (1)$$

где u_d и u_q – напряжения статора; $(i_d \cdot \psi_q - i_q \cdot \psi_d) = M_{СГ}$ – электромагнитный момент синхронного генератора, создающий сопротивление вращению; T_j – механическая постоянная времени системы “СГ + приводной двигатель”; $\psi_q, \psi_d, \psi_f, \psi_{Dd}, \psi_{Dq}$ – потокосцепления обмоток модельного СГ, которые определяются выражениями:

$$\begin{cases} \psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{Dd}, \\ \psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{Dq}, \\ \psi_f = x_d i_d + x_f i_f + x_{ad} i_{Dd}, \\ \psi_{Dd} = x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_{Dd} i_{Dd}, \\ \psi_{Dq} = x_{aq} i_q + x_{Dq} i_{Dq}, \end{cases} \quad (2)$$

где x_{ad} – сопротивление взаимной индукции СГ по продольной оси d;
 x_{aq} – сопротивление взаимной индукции СГ по поперечной оси q;
 x_s – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора;
 x_f – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения;
 x_{Dd} , x_{Dq} – индуктивные сопротивления рассеяния демпферных обмоток по осям d и q;
 R_s , R_f , R_{Dd} , R_{Dq} – активные сопротивления обмоток СГ.

Полные индуктивные сопротивления обмоток равны сумме индуктивных сопротивлений взаимной индукции и индуктивного сопротивления рассеяния:

$$\begin{aligned} x_d &= x_{ad} + x_s, & x_q &= x_{aq} + x_s, & x_f &= x_{ad} + x_{\sigma f}, \\ x_{Dd} &= x_{ad} + x_{\sigma Dd}, & x_{Dq} &= x_{aq} + x_{\sigma Dq}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если в результате решения УПГ получены, например, токи i_d и i_q , то ток i_A фазы А физического генератора определится выражением

$$i_A = i_d \cos(\gamma_0 + \omega_c t) - i_q \sin(\gamma_0 + \omega_c t), \quad (4)$$

где ω_c – частота тока в сети; t – физическое время;

γ_0 – начальный угол (при $t=0$) между осями d и q.

Вращающий момент дизеля $M_{диз}$ в системе (1) должен быть выражен в относительных единицах

$$M_{диз} = \frac{M_{диз.физ}}{M_{сг.ном}} \quad (5)$$

Из системы (2) токи обмоток выражаются через потокосцепления по формулам

$$\left\{ \begin{array}{l} i_d = \frac{x_f x_{yd} - x_{ad}^2}{D_d} \psi_d - \frac{x_{ad} x_{\sigma Dd}}{D_d} \psi_f - \frac{x_{ad} x_{\sigma f}}{D_d} \psi_{Dd}, \\ i_q = \frac{x_{Dq}}{D_q} \psi_q - \frac{x_{aq}}{D_q} \psi_{Dq}, \\ i_f = \frac{x_d x_{Dd} - x_{ad}^2}{D_d} \psi_f - \frac{x_{ad} x_{\sigma Dd}}{D_d} \psi_d - \frac{x_{ad} x_s}{D_d} \psi_{Dd}, \\ i_{Dd} = \frac{x_f x_d - x_{ad}^2}{D_d} \psi_{Dd} - \frac{x_{ad} x_{\sigma}}{D_d} \psi_d - \frac{x_{ad} x_s}{D_d} \psi_f, \\ i_{Dq} = \frac{x_q}{D_q} \psi_{Dq} - \frac{x_{aq}}{D_q} \psi_q, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $D_d = x_d x_f x_{Dd} + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2(x_d + x_f + x_{Dd})$, $D_q = x_q x_{Dq} + x_{aq}^2$.

При моделировании процессов в СГ по УПГ (1) в качестве переменных интегрирования используются потокосцепления $\psi_q, \psi_d, \psi_f, \psi_{Dd}, \psi_{Dq}$. Поэтому в (1) все токи должны быть заменены согласно (6). При решении УПГ будут получены значения потокосцеплений $\psi_q, \psi_d, \psi_f, \psi_{Dd}, \psi_{Dq}$. Пересчет потокосцеплений в токи выполняется по формулам (6).

Для исследования асинхронного режима работы одного из параллельно работающих генераторов, входящих в состав СЭЭС, необходимо привести уравнения Парка-Горева одного генератора к другому [1,3]. Роторы параллельно работающих СГ не имеют между собой жесткого соединения, вращаются с разными частотами и занимают различное положение в пространстве, поэтому оси d_1-q_1 , d_2-q_2 являются несовпадающими. Между осями $d-q$ параллельно работающих СГ существуют углы, которые обозначим как δ . Для объединения УПГ параллельно работающих СГ в одну систему уравнений необходимо их дополнить уравнениями связи, являющимися функциями углов δ . Для ведущего генератора СГ1 моделью является система УПГ (1) и выражения-определения потокосцеплений (2), в которых произведена следующая замена индексов: $d \rightarrow 1d$ и $q \rightarrow 1q$. Токи и напряжения статора в модели имеют обозначения $i_{1d}, i_{1q}, u_{1d}, u_{1q}$. Составляющие напряжения сети u_{cd} и u_{cq} принимаются равными составляющим u_{1d} и u_{1q} напряжения СГ1. Под этим напряжением находятся потребители нагрузки электростанции и при известной нагрузке рассчитываются

составляющие i_{Hd}, i_{Hq} ее тока, которые привязаны к осям d_1-q_1 СГ1 (рис.1).

Модель ведомого генератора СГ2 является система УПГ (1) и выражения-определения потокосцеплений (2), в которых произведена следующая замена индексов: и $q \rightarrow 2q$ и $d \rightarrow 2d$. Токи и напряжения статора в модели имеют обозначения $i_{2d}, i_{2q}, u_{2d}, u_{2q}$. СГ2 подключен к общим с СГ1 шинам главного распределительного щита (ГРЩ) и участвует в создании тока в нагрузке, который обозначим как комплексную величину \dot{I}_{2H} . СГ1 также создает в нагрузке ток, который обозначим как комплексную величину \dot{I}_{1H} . Полный комплексный ток нагрузки \dot{I}_H является суммой указанных токов: $\dot{I}_H = \dot{I}_{1H} + \dot{I}_{2H}$. Просуммировать комплексные токи можно при условии, что электрические фазы слагаемых токов отсчитаны относительно общих координатных осей. С этой целью необходимо ввести блоки приведения токов i_{2d} и i_{2q} , рассчитанных на модели СГ2 в осях d_2-q_2 , к эквивалентным токам, но в осях d_1-q_1 .

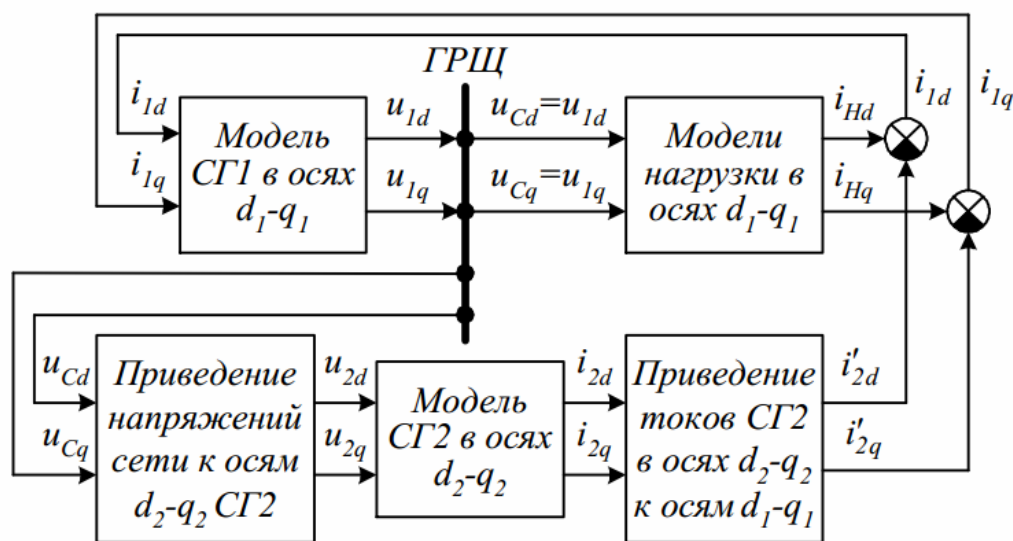


Рисунок 1 - Структурная схема СЭЭС с параллельно работающими СГ

Для вывода формул приведения рассмотрим обобщенный вектор тока \dot{I}_2 со стороны пар осей d_1-q_1 и d_2-q_2 (рис.2). Проекциями \dot{I}_2 на оси d_2-q_2 будут токи i_{2d} и i_{2q} , которые являются действительными токами, рассчитанными из модели СГ2 в осях d_2-q_2 . Проекциями \dot{I}_2 на оси d_1-q_1 будут токи i_{21d} и i_{21q} , которые являются фиктивными то-

ками. У пар токов $i_{2d} - i_{2q}$ и $i_{21d} - i_{21q}$ общим является вектор тока \dot{I}_2 . Поэтому, пара токов .. - i_{21q} заменяет пару токов $i_{2d} - i_{2q}$.

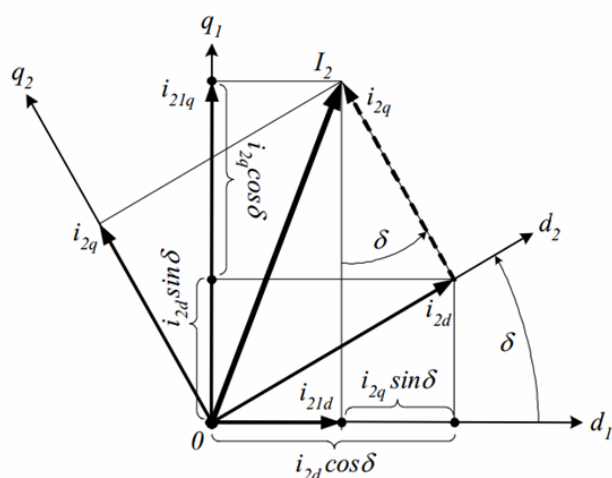


Рисунок 2 - Векторная диаграмма приведения токов СГ2 к СГ1

Роторы параллельно работающих генераторов вращаются не-синхронно, следовательно, между осями d_1-q_1 и d_2-q_2 имеется угол δ . При найденных из моделей СГ1 и СГ2 значениях скольжений s_1 и s_2 , угол δ может быть найден из выражения:

$$\delta = \int (s_2 - s_1) dt. \quad (7)$$

При компьютерном моделировании вместо (7) используется эквивалентное ему дифференциальное уравнение в нормальной форме:

$$\frac{d\delta}{dt} = s_2 - s_1. \quad (8)$$

Из построений, приведенных на рис.2, следуют формулы приведения токов СГ2, определенных в осях d_2-q_2 , в токи осей d_1-q_1 :

$$\begin{cases} i_{21d} = i_{2d} \cos \delta - i_{2q} \sin \delta \\ i_{21q} = i_{2d} \sin \delta + i_{2q} \cos \delta \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{vmatrix} i_{21d} \\ i_{21q} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \delta - \sin \delta \\ \sin \delta + \cos \delta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{vmatrix} \quad (9)$$

Для приведения найденных из модели СГ2 в относительных единицах токов i_{21d} и i_{21q} к токам в относительных единицах модели СГ1, необходимо учесть коэффициент приведения номинальных полных мощностей СГ, равный

$$K_S = \frac{S_{НОМ.СГ1}}{S_{НОМ.СГ2}}. \quad (10)$$

Приведенные к СГ1 токи ведомого СГ2 определяются по формулам

$$\begin{cases} i'_{2d} = K_S \cdot i_{21d}, \\ i'_{2q} = K_S \cdot i_{21q}. \end{cases} \quad (11)$$

Теперь могут быть найдены составляющие тока СГ1 в токе нагрузки:

$$i_{1d} = i_{Hd} - i'_{2d}, i_{1q} = i_{Hq} - i'_{2q}. \quad (12)$$

Эти токи подаются на вход модели СГ1. Аналогично токам, требуется также приведение напряжений сети u_{Cd} и u_{Cq} , которые рассчитаны в осях d_1-q_1 , к напряжениям u_{2d} и u_{2q} в осях d_2-q_2 , в которых моделируется СГ2:

$$\begin{vmatrix} u_{2d} \\ u_{2q} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \delta - \sin \delta \\ \sin \delta + \cos \delta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Напряжения u_{2d} и u_{2q} являются входными для модели СГ2 и используются в УПГ, описывающих этот генератор.

Для численной реализации математических моделей (1), (2), (12), (13) и моделей ответственных судовых потребителей электроэнергии с помощью средств визуально-ориентированного приложения Simulink системы MATLAB версии R2012b разработана компьютерная модель СЭЭС контейнеровоза MSC Japan (рис. 3). Подсистема Load моделирует работу асинхронных приводов наиболее ответственных судовых потребителей. Компьютерное моделирование динамических процессов проводится в нагруженной СЭЭС, поэтому для адекватного представления реальных явлений проведена предварительная инициализация моделей электрических машин, входящих в состав разработанной модели. В процессе компьютерного моделирования имитировалась потеря питания обмотки возбуждения СГ №2 в момент времени 3 секунды и его восстановление в момент времени 6с. В результате проведенного имитационного моделирования получены осциллограммы относительных значений активной и реактивной мощностей синхронных генераторов (рис. 4 – рис. 7), а также составляющих токов статоров по продольной и поперечной осям.

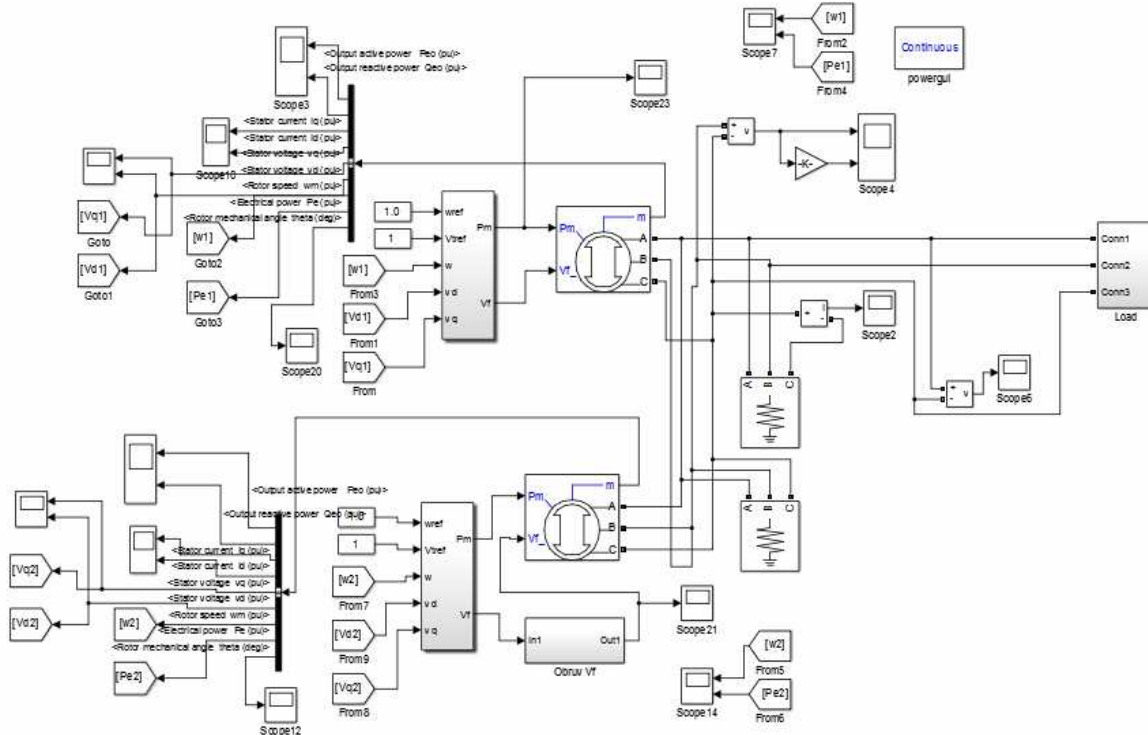


Рисунок 3 - Компьютерная модель для исследования динамических процессов при переходе одного из параллельно работающих СГ в асинхронный режим

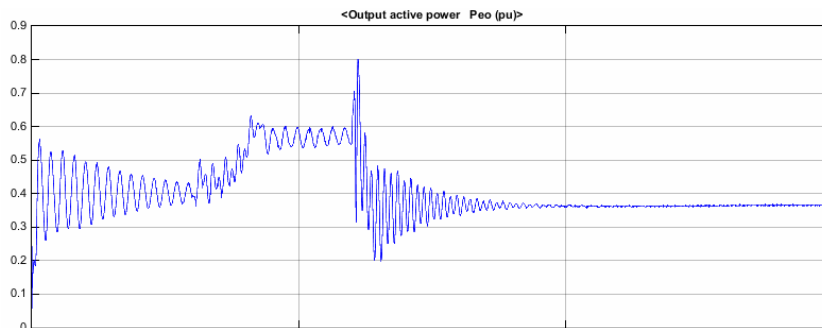


Рисунок 4 - Временная зависимость активной мощности СГ №1

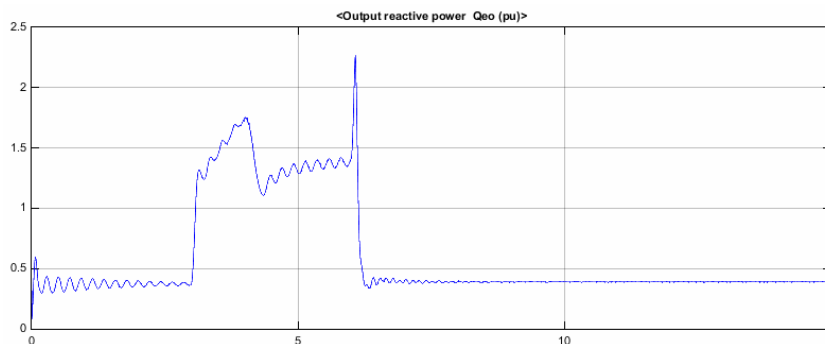


Рисунок 5 - Временная зависимость реактивной мощности СГ №1

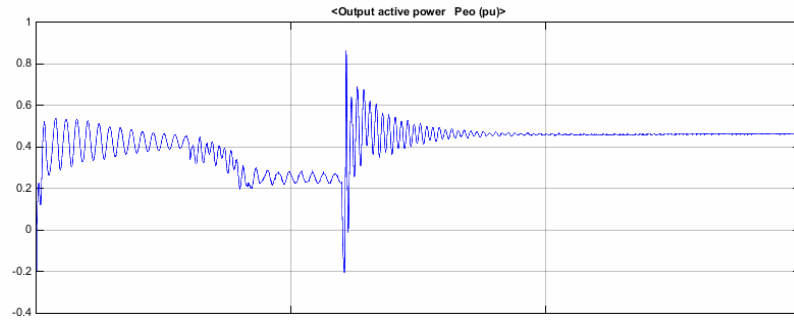


Рисунок 6 - Временная зависимость активной мощности СГ №2

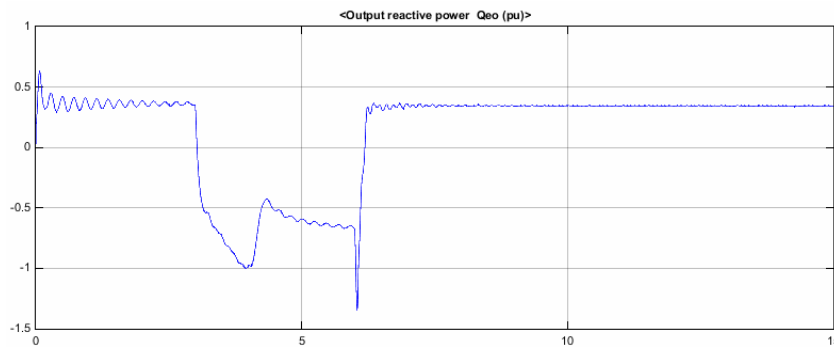


Рисунок 7 - Временная зависимость реактивной мощности СГ №2

Заключение. Полученные результаты компьютерного моделирования динамических процессов в СЭЭС позволяют предложить инженерно-технические решения, направленные на выявление асинхронного режима параллельно работающего СГ в составе СЭЭС и устранение последствий этого режима путем подключения альтернативных источников питания, что, в свою очередь, позволит повысить эксплуатационную надежность СЭЭС. Перспективы дальнейших исследований заключаются в исследовании эксплуатационной надежности автономных электроэнергетических систем различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическая часть станций и подстанций / Под. ред. А.А. Васильева. – М.: Энергия, 1980. – 608 с.
2. Мелешкин Г.А. Устойчивость энергосистем. Книга 1 / Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев. – СПб, 2006. – 289с.
3. Краснов В.В. Основы теории и расчета судовых электроэнергетических систем: Моделирование для исследования специальных режимов / В.В. Краснов, П.А. Мещанинов, А.П. Мещанинов. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
4. Эксплуатация электроэнергетических систем морских судов: Справочник / О.П. Хайдуков, А.Н. Дмитриев, Г.Н. Запорожцев. – М.: Транспорт, 1988. – 223 с.
5. Эксплуатация генераторов и синхронных компенсаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.motor-remont.ru/books...
6. Толстов А.А. Параллельная работа синхронных генераторов с возможностью регулирования коэффициента мощности / А.А. Толстов, В.В. Лещенко, Е.С. Логвиненко // Судовые энергетические установки. – Одесса, 2008. – Вып.22. – С. 54–66.
7. Геллер Б.Л. Моделирование параллельной работы судовых синхронных генераторов в пакете VisSim / Б.Л. Геллер, Н.В. Сулименко // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2010. – № 18. – С. 160–166.
8. Совалов С.А. Противоаварийное управление в энергосистемах / С.А. Совалов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 416 с.