ШКОЛА MATLAB.

Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab-Simulink. Исследование статической неустойчивости параллельно работающих синхронных генераторов в судовой электрической сети

В статье рассмотрена проблема, которая стоит перед исследователями с того момента, как в судовой электроэнергетической системе появились синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением. Теорией таких судовых электроэнергетических систем исследователи занимаются давно и достаточно успешно, что подтверждается многочисленными публикациями, например [1–9]. Однако устойчивость работы данной системы остается не до конца выясненной. В публикации сделана попытка объяснить появление статической неустойчивости на основании совместного анализа электромагнитных процессов в синхронных генераторах, работающих при параллельном включении на общую нагрузку.

Сергей Герман–Галкин, д. т. н., профессор

s.german-galkin@am.szczecin.pl

Дарий Тарнапович, к. т. н.

D.Tarnapowicz @am.szczecin.pl

Введение

Надежность и безотказность функционирования судовой энергосистемы вызывает необходимость совместной работы нескольких дизель-генераторных установок (агрегатов D-G), генераторы которых работают на общую электрическую судовую сеть. При этом каждый агрегат D-G имеет различные системы защиты. Системы защиты судовых синхронных генераторов (SG) позволяют в основном устранить потенциальные сбои, представляющие большую угрозу эксплуатации судна и безопасности экипажа. Согласно требованиям классификационных обществ [10–13], эти системы обеспечивают защиту по четырем параметрам:

- токовая перегрузка;
- короткое замыкание;
- реверсивная активная мощность (переход SG в двигательный режим);
- пониженное напряжение.

Однако существует еще одна причина, при которой может наступить авария судовой энергосистемы, — это потеря возбуждения одним из генераторов, включенным в общую электрическую сеть параллельно с другим или другими генераторами. Такая неисправность энергосистемы получила название «потеря возбуждения» (LOE — Loss of Excitation) [14, 15]. В настоящее время отсутствуют теоретические исследования в установлении причин, приводящих к потере возбуждения судовых синхронных генераторов в дизель-генераторных установках. Вероятно, в связи с этим судовые классификационные общества и не требуют использования защиты от потери возбуждения генератора. Хотя в случае параллельной работы синхронных генераторов на общую сеть проблема LOE остается, а потому существует и необходимость анализа электромагнитных и энергетических процессов в судовой электрической сети, чтобы понять, каковы причины возникновения и способы решения этих проблем.

Следует отметить, что анализ электромагнитных и энергетических процессов при потере возбуждения в SG, работающем параллельно с жесткой сетью, достаточно широко описан в литературе [16–18] и изучен. Однако в случае судовых электростанций, где параллельно работают два или более генераторов приблизительно одинаковой мощности, отмеченные проблемы, насколько это известно авторам, не рассматривались. Неисправности в цепи возбуждения генератора

возникают по различным причинам, но все они, как правило, приводят к уменьшению тока возбуждения. Анализ двух параллельно действующих генераторов, представленный в настоящей статье, показал, что положение рабочей точки каждого генератора взаимосвязано, уменьшение возбуждения одного генератора (неисправного) вызывает автоматическое изменение возбуждения в другом генераторе (исправном), что специфично для судовой энергосистемы. Результаты исследований продемонстрировали, что отсутствие защиты от пониженного возбуждения одного (неисправного) генератора вынуждает срабатывать защиту и отключаться другой (исправный) генератор, что в случае совместной работы обоих генераторов приводит к полному отключению электропитания судна.

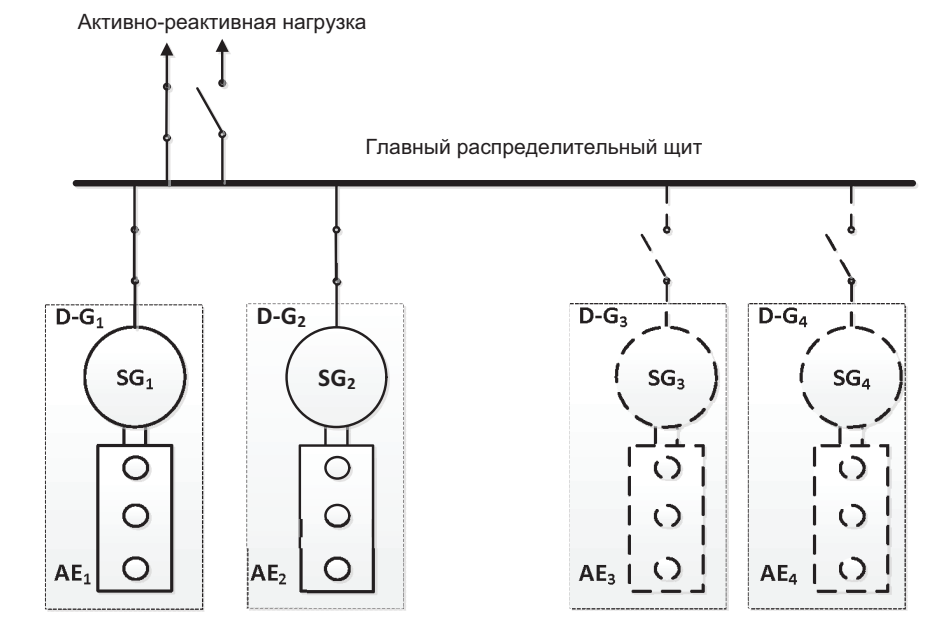

Рис. 1. Функциональная схема судовой электрической сети

Функциональная схема и качественный анализ судовой электрической сети

Основными элементами судовых энергетических систем обычно являются синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением (SG — Synchronous Generator), которые приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания (AE — Auxiliary Engines). Система судовой электростанции состоит как минимум из двух генераторных установок (чаще всего три или более, рис. 1). Специфика судовой электросети связана с сопоставимостью мощности некоторых отдельных приемников с мощностью генераторов. Это так называемая «мягкая» сеть.

Одна из частых причин возникновения статической неустойчивости SG в «мягкой» сети — потеря возбуждения вследствие емкостного характера его нагрузки.

Для оценки статической устойчивости работы одного SG, работающего параллельно с «жесткой» сетью постоянной частоты f_1 и напряжения U_1, используется семейство V-образных характеристик [5]. Построенные для трех значений активной выходной мощности P_1 генератора в относительных величинах, эти характеристики показаны на рис. 2 и представляют собой зависимость тока I_1 на выходе генератора от тока возбуждения I_f, $I_1 = f(I_f)$. Минимумы токов I_1 семейства V-образных характеристик лежат на кривой CD и представляют собой регулировочную характеристику СГ при $\cos\varphi = 1$.

В точках V-образных характеристик, лежащих справа от кривой CD, нагрузка на генератор носит активно-индуктивный характер, ток нагрузки подмагничивает генератор, и его ЭДС возрастает по сравнению с напряжением сети. В точках, лежащих слева от кривой CD, нагрузка на генератор носит активно-емкостный характер, ток нагрузки размагничивает генератор, и его ЭДС уменьшается по сравнению с сетью. Кривая AB служит границей статической устойчивости. На этой кривой ЭДС генератора становится достаточно малой, генератор теряет способность самостоятельно поддерживать синхронное вращение и выпадает из синхронизма (переходит в асинхронный режим работы).

Иная физическая картина наблюдается в электрических сетях автономных объектов, в частности в судовых электрических сетях. В таких («мягких») сетях на общую нагрузку работает, как правило, два генератора приблизительно одинаковой мощности. При этом положения рабочей точки каждого генератора на V-образных характеристиках взаимосвязаны и изменение тока возбуждения одного генератора влечет за собой автоматическое изменение тока возбуждения другого.

Базой аналитических методов рассматриваемого класса систем служат теоретические положения, изложенные в классических трудах по электрическим машинам [2, 4, 5, 9].

При этом исследование электромагнитных и энергетических процессов необходимо осуществлять с различной степенью упрощения в зависимости от решаемых задач [8].

Ниже эти задачи решаются без учета демпферных обмоток SG, апериодических составляющих токов статора SG и изменения скорости вращения вала SG.

Качественную оценку взаимовлияния генераторов, работающих на общую нагрузку, осуществим с помощью векторных диаграмм неявнополюсных генераторов с одинаковыми параметрами. Каждый из этих генераторов содержит замкнутую систему стабилизации скорости и напряжения.

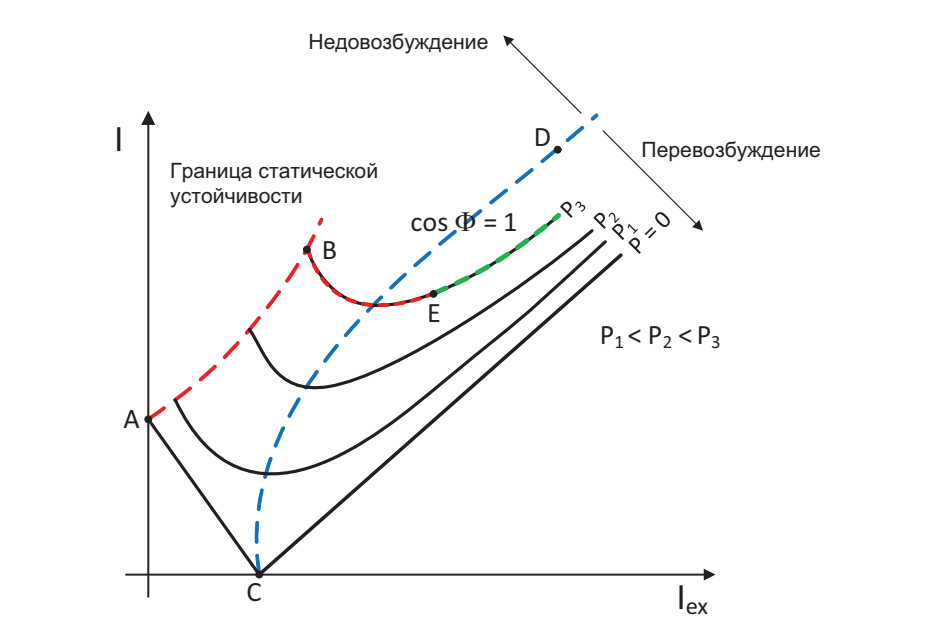

Рис. 2. V-образные характеристики СГ, работающего параллельно с «жесткой» сетью

Анализ электромагнитных процессов двух параллельно работающих генераторов

Векторные диаграммы двух одинаковых генераторов, подключенных параллельно на общую нагрузку, представлены на рис. 3. Обозначения, принятые на векторной диаграмме, следующие: $\overline{U}_L, \overline{I}_L = \overline{I}_1 + \overline{I}_2$ — напряжение и ток нагрузки, токи якоря первого и второго генератора; φ — сдвиг по фазе между током и напряжением нагрузки; $r_1 = r_2 = r$ — активное сопротивление якоря первого и второго генератора; $-x_1 = x_2 = x = \omega_1 L_S$ — реактивное сопротивление якоря первого и второго генератора; $\overline{E}_1, \overline{E}_2$ — ЭДС первого и второго генератора; δ_1, δ_2 — углы нагрузки первого и второго генератора; α — угол рассогласования первого генератора (сдвиг по фазе между током первого генератора и током нагрузки); β — сдвиг по фазе между током второго генератора и напряжением нагрузки.

На векторных диаграммах представлено два случая. В первом случае (рис. 3а) параметры регуляторов напряжения и регуляторов скорости обоих генераторов одинаковы, одинаковы при этом активные и реактивные мощности (токи), отдаваемые генераторами в нагрузку, и ЭДС генераторов. Во втором случае (рис. 3б) напряжение и ток нагрузки остаются без изменения, ток якоря и ЭДС возбуждения второго генератора меньше, чем первого, а активные токи генераторов остаются равными.

Векторная диаграмма симметрично работающих генераторов (рис. 3а) соответствует точке *E* на рис. 2. Появление разности

$$\Delta\overline{E} = \overline{E}_1 - \overline{E}_2$$

приводит к тому, что рабочая точка первого («исправного») генератора смещается вправо от точки E, а рабочая точка второго (неисправного») генератора смещается влево от точки. Это смещение приводит к возрастанию $\Delta\overline{E}$, что вызывает еще большее расхождение рабочих точек генераторов. Таким образом, малая асимметрия в каналах возбуждения генераторов приводит к появлению в системе *положительной обратной связи*, которая рабочую точку одного («неисправного») генератора выводит на границу АВ статической устойчивости.

Исследования, представленные ниже, осуществлены для лабораторных генераторов 50 Гц, 400 В, 20 кВ·А, 1500 RPM, параметры которых приведены в таблице.

На векторной диаграмме (рис. 3б) хорошо видно, что при неизменном суммарном токе нагрузки $\overline{I}_L$ токи $\overline{I}_1$ и $\overline{I}_2$ могут быть разными. При этом в токе $\overline{I}_1$ растет индуктивная составляющая, а в токе $\overline{I}_2$ индуктивная составляющая первоначально уменьшается, а затем появляется и растет емкостная составляющая.

Процесс изменения токов протекает во времени, при этом во времени изменяются значения связанных фаз α и β, а также углов нагрузки δ_1, δ_2. Далее при анализе в качестве независимого аргумента принимается угол рассогласования α при его изменении от значения $\alpha_0 = \varphi$.

Таблица. Паспортные параметры синхронного генератора

S, кВ·А	U, В	I, А	F, Гц	n, об/мин	p	U_f, В	I_f, А	r, Ом	L_s, Гн
20	400	29	50	1500	2	50	8,3	1,0	0,012

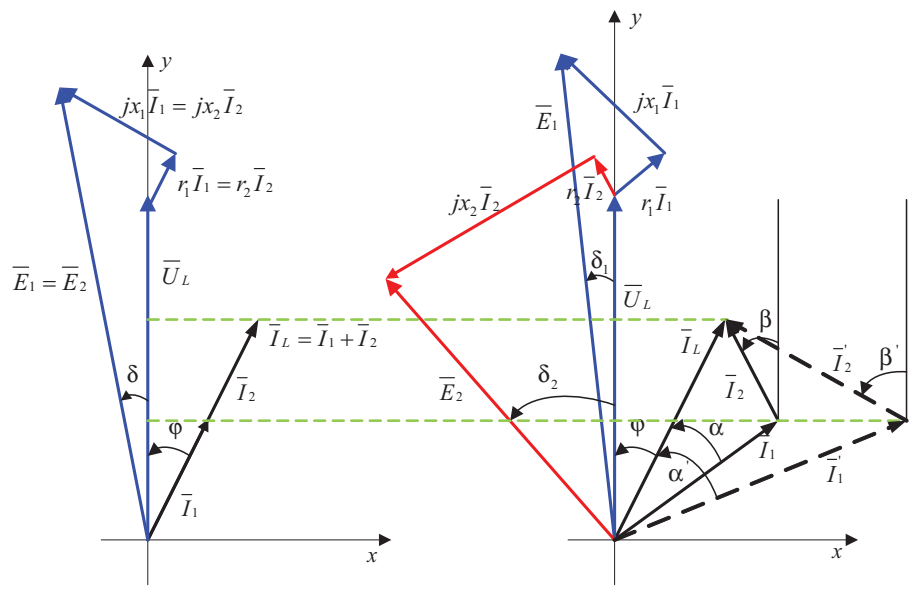

Рис. 3. Векторные диаграммы генераторов: а) в согласованном режиме работы; б) в рассогласованном режиме работы

Уравнения для расчета токов генераторов, полученные из геометрических соотношений векторной диаграммы, приведены ниже.

$$I_{1y} = kI_L\cos\varphi,$$
$$I_{2y} = (1-k)I_L\cos\varphi,$$
$$I_{1x} = kI_L\cos\varphi \times tg(\varphi+\alpha),$$
$$I_{2x} = I_L\sin\varphi - (1-k)I_L\cos\varphi \times tg(\varphi+\alpha),$$
$$I_1 = \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2},$$
$$I_2 = \sqrt{I_{2x}^2 + I_{2y}^2}. \qquad (1)$$

Коэффициент нагрузки *k* изменяется в диапазоне $0 \le k \le 1$ в зависимости от распределения активной нагрузки между генераторами. Дальнейшие исследования осуществлены при одинаковом распределении активной нагрузки между генераторами для $k = 0{,}5$.

Активные мощности нагрузки и генераторов в этом случае определяются из уравнений:

$$P_{1L} = 1{,}5U_L I_L\cos\varphi,$$
$$P_1 = P_2 = 0{,}75U_L I_L\cos\varphi, \qquad (2)$$

где $U_L I_L$ — амплитудные значения фазного напряжения и тока нагрузки.

По уравнениям (1) для $k = 0{,}5$ и $\varphi = \pi/6$ на рис. 4 построены зависимости реактивных

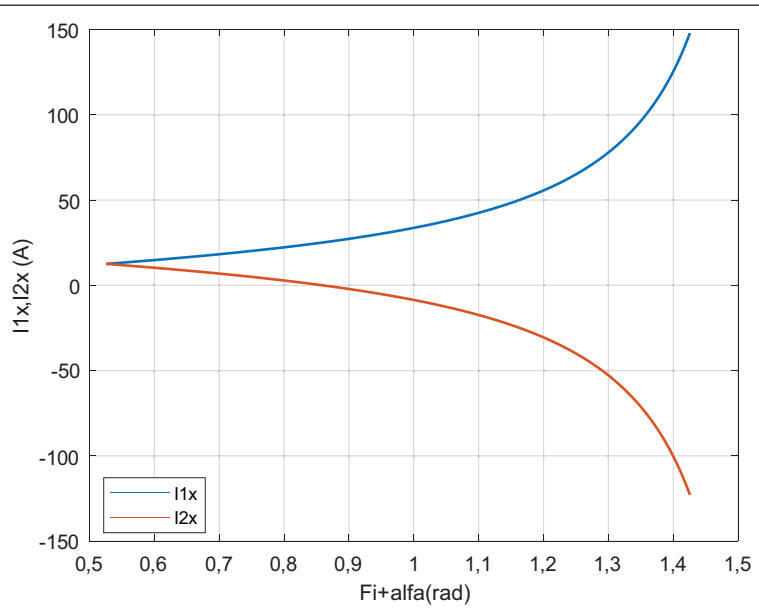

Рис. 4. Зависимости реактивных токов генераторов от угла рассогласования

токов генераторов от угла α + φ при заданном значении активной мощности в нагрузке, которые свидетельствуют о том, что полный ток «исправного» генератора значительно превышает полный ток «неисправного» генератора.

Значения углов нагрузки δ_1 и δ_2, генераторов, а также ЭДС генераторов определяются из геометрических построений векторной диаграммы (рис. 3б):

$$\delta_1 = arctg\frac{x_1 I_{1y} - r_1 I_{1x}}{U_L + x_1 I_{1x} + r_1 I_{1y}},$$

$$E_1 = \sqrt{\left(U_L + x_1 I_{1x} + r_1 I_{1y}\right)^2 + \left(-x_1 I_{1y} + r_1 I_{1x}\right)^2},$$

$$\delta_2 = arctg\frac{x_2 I_{2y} - r_2 I_{2x}}{U_L + x_2 I_{2x} + r_2 I_{2y}},$$

$$E_2 = \sqrt{\left(U_L + x_2 I_{2x} + r_2 I_{2y}\right)^2 + \left(-x_2 I_{2y} + r_2 I_{2x}\right)^2}. \quad (3)$$

По уравнениям (3) на рис. 5 построены зависимости углов нагрузки первого и второго генератора от угла α + φ, которые позволяют судить об устойчивости работы всей системы. Появление асимметрии в возбуждении генераторов приводит, в соответствии с уравнениями (3), к изменению углов нагрузки. Эти изменения продолжаются до значения $\delta_2 \approx \pi/2$, когда второй генератор выпадает из синхронизма (на линии АВ, рис. 2). Резкий скачок угла нагрузки второго генератора (рис. 5) свидетельствует о появлении статической неустойчивости в системе. Заметим, что активные мощности генераторов в синхронном режиме работы остаются постоянными и равными (уравнение 2).

Электродвижущие силы якоря генераторов рассчитываются по уравнениям (3), они представлены на рис. 6. Потеря возбуждения второго генератора произойдет при $E_2 \approx 180$ В, при этом $E_1 \approx 700$ В.

При найденных реактивных токах реактивные мощности в системе двух параллельно работающих генераторов определяются на основании векторной диаграммы по уравнениям, приведенным ниже:

$$Q_1 = 1,5 U_L I_1 \sin(\varphi + \alpha) = 1,5 U_L I_{1x},$$
$$Q_2 = 1,5 U_L I_2 \sin(\varphi + \beta) = 1,5 U_L I_{2x}. \quad (4)$$

В которых

$$\beta = arctg\frac{x_2 I_{2x} + r_2 I_{2y}}{x_2 I_{2y}}.$$

Зависимости реактивных мощностей синхронных генераторов от угла рассогласования, рассчитанных по уравнениям (4), представлены на рис. 7.

По результатам аналитического исследования электромагнитных и энергетических процессов параллельно работающих синхронных генераторов на общую нагрузку можно сделать следующие выводы:

1. Анализ электромагнитных и энергетических процессов в установившемся режиме работы системы позволяет выявить и количественно определить значения переменных

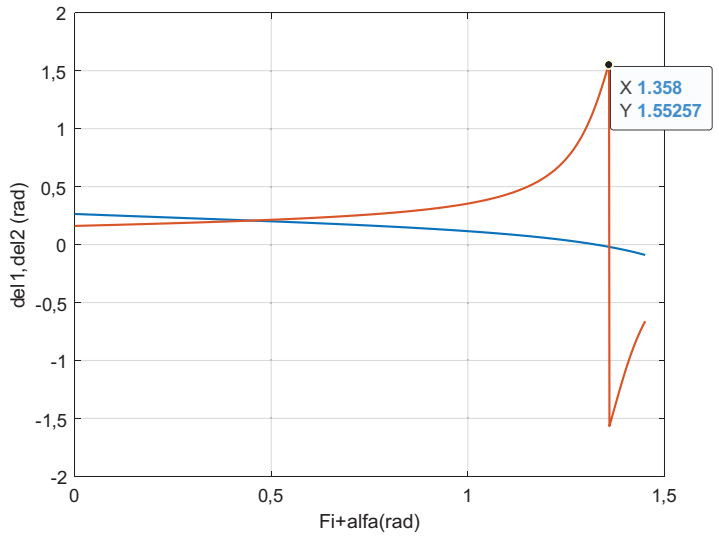

Рис. 5. Зависимость углов нагрузки СГ1 и СГ2 от угла рассогласования

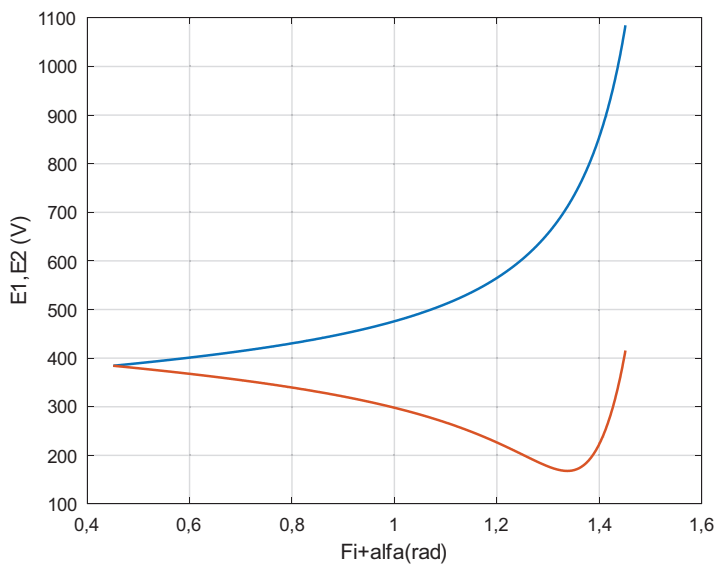

Рис. 6. Зависимость ЭДС СГ1 и СГ2 от угла рассогласования

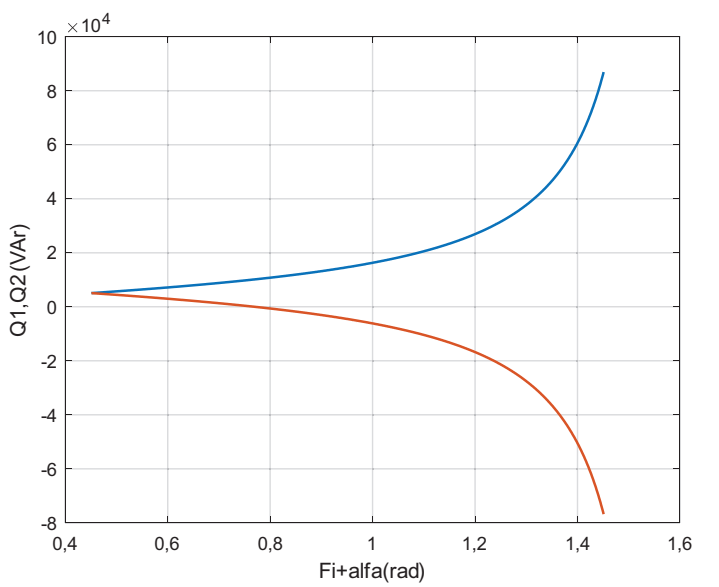

Рис. 7. Зависимости реактивных мощностей синхронных генераторов от угла рассогласования

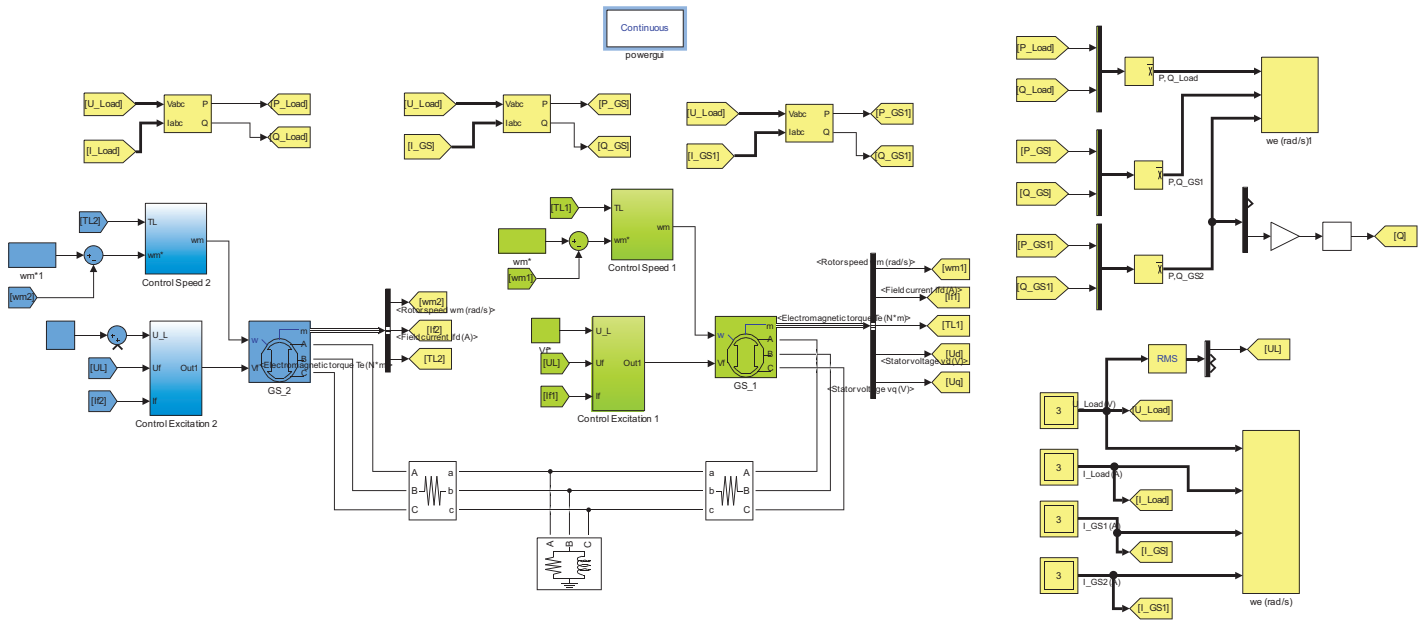

Рис. 8. Виртуальная модель двух параллельно работающих генераторных установок

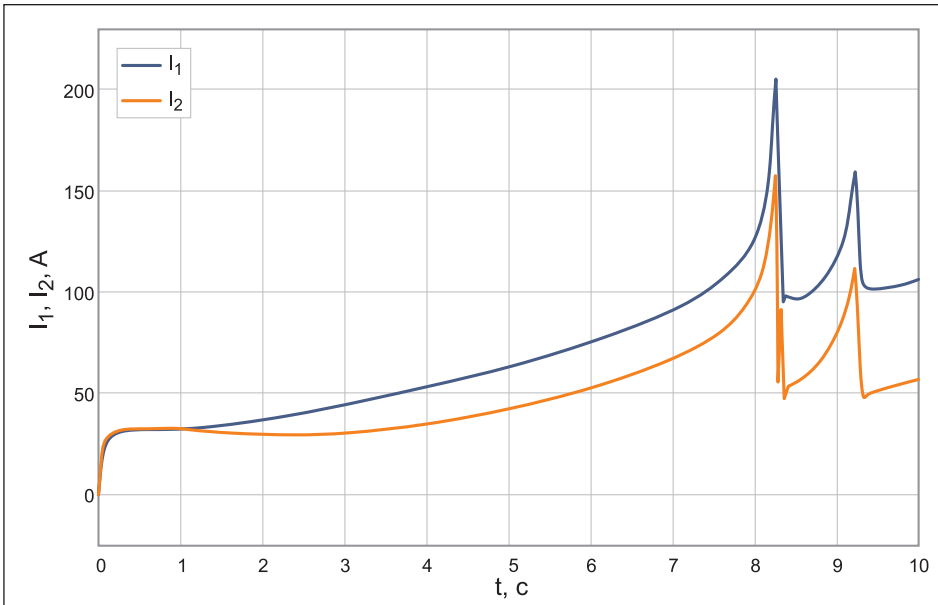

Рис. 9. Токи «исправного» (I_1) и «неисправного» (I_2) генератора

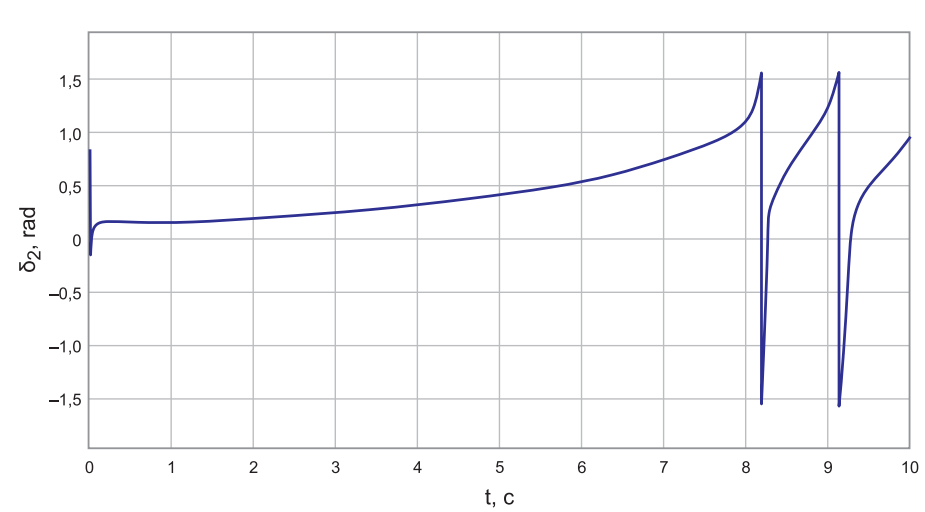

Рис. 10. Угол нагрузки «неисправного» генератора

состояния, при которых в системе наступает статическая неустойчивость.

2. Сравнение токов генераторов свидетельствует о том, что ток в «исправном» генераторе превышает ток в генераторе «неисправном», что приводит к отключению системой защиты первого. Поэтому в системе с двумя генераторами может наступить полное обесточивание судна (*Block out*).
3. Потеря статической устойчивости «неисправного» генератора наступает при его размагничивании и уменьшении ЭДС приблизительно до половины от номинальной.
4. Размагничивание «неисправного» генератора сопровождается ростом реактивной отрицательной (емкостной) мощности этого генератора.

Модельное исследование и результаты

Виртуальная модель двух параллельно работающих генераторных установок на общую нагрузку приведена на рис. 8. Каждый генератор (блоки GS_1, GS_2) содержит собственный регулятор скорости (блоки *Control Speed_1*, *Control Speed_2*) и собственный регулятор напряжения (блоки *Control Excitation_1*, *Control Excitation_2*). «Повреждение» системы возбуждения генератора осуществляется уменьшением его напряжения возбуждения.

Результаты модельного исследования двух параллельно функционирующих генераторных установок представлены на рис. 9–11. В модели не использованы средства защиты, поэтому в ней при потере статической устойчивости наблюдаются нелинейные колебательные процессы, обусловленные наличием регуляторов напряжения и мощности в каждом DG-агрегате.

Полный ток (I_1) «исправного» генератора (рис. 9) в области устойчивой работы, когда оба SG работают в синхронном режиме, значительно превышает ток (I_2) «неисправного» генера-

тора, что на практике приводит к его отключению защитой от токовой перегрузки. Угол нагрузки «неисправного» генератора δ_2 растет со временем (рис. 10) до значения $\delta_2 \approx \pi/2$, при котором SG выпадает из синхронизма.

Активные мощности в нагрузке и в каждом генераторе (рис. 11) остаются постоянными в синхронном режиме работы. Реактивная мощность в «исправном» генераторе растет, оставаясь положительной (индуктивной). Реактивная мощность в «неисправном» генераторе первоначально уменьшается, а затем растет, оставаясь отрицательной (емкостной). Когда рабочая точка «неисправного» генератора достигает линии AB (рис. 2), он тратит синхронизацию и переходит в асинхронный режим. При этом за счет наличия регуляторов скорости и напряжения в системе из двух генераторов наблюдаются нелинейные автоколебательные процессы.

Лабораторная установка

Практическое испытание параллельной работы двух блоков *D-G1* и *D-G2* проводилось на лабораторном стенде, подробное описание которого дано в [19]. На рис. 12 представлено фото описанной лабораторной установки. Ее основными элементами являлись:

- *SG1, SG2* — синхронные генераторы; тип — *ELMOR GCf74* с параметрами, указанными в таблице;
- CM1, CM2 — приводные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором — *ELMOR MSSfc200L4*, моделирующие дизельные двигатели с регуляторами скорости;
- *CONV1, CONV2* — полупроводниковые преобразователи питания CM1, CM2;
- *SG1 Breaker, SG2 Breaker* — регуляторы напряжения для генераторов — *ANCIAC 80*;
- M1 — измеритель качества энергии и мощности — *TEAMWARE-WALLY_A/A3* (измерение *I1, P1, Q1*);
- M2 — измеритель качества энергии и мощности — *SONEL-PQM700* (измерение *I2, P2, Q2*);
- *Load* — нагрузка генераторных установок (12 кВт, 4,8 кВ·Ар).

Результаты испытаний, проведенных на представленной лабораторной установке, подтвердили аналитические расчеты и модельные эксперименты.

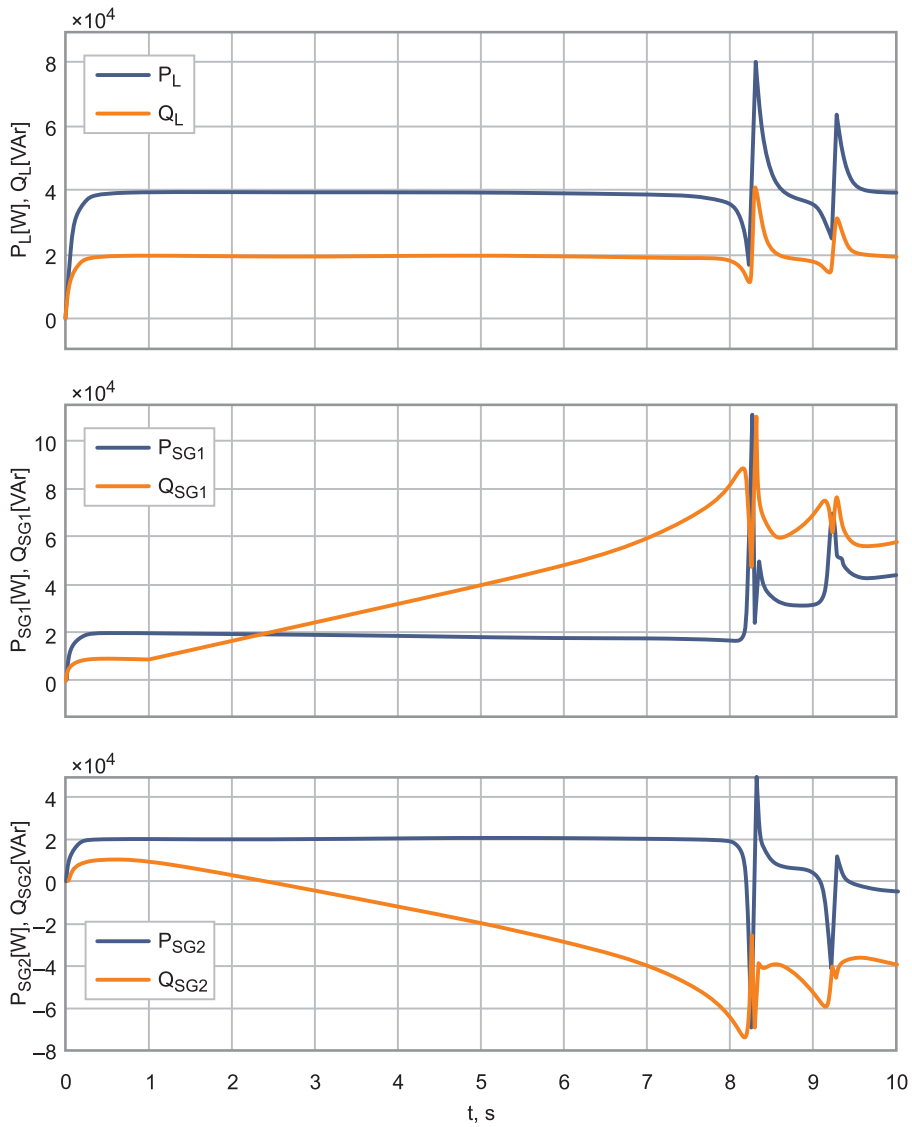

Рис. 11. Активные и реактивные мощности в нагрузке (P_L, Q_L) «исправного» (P_{SG1},Q_{SG1}) и «неисправного» (P_{SG2},Q_{SG2}) генераторов

Выводы

Аналитические, модельные и экспериментальные результаты исследования судовой системы электропитания, состоящей из двух дизель-генераторных установок с двумя синхронными генераторами SG_1, SG_2 при их параллельной работе на общую сеть, подтвердили существование статической неустойчивости, приводящей к потере возбуждения одним из генераторов. При этом доказано, что существующая система защиты отключает исправно работающий генератор, создавая угрозу *block out* в системе электропитания судна. Таким образом, результаты, представленные в статье, доказывают необходимость реализа-

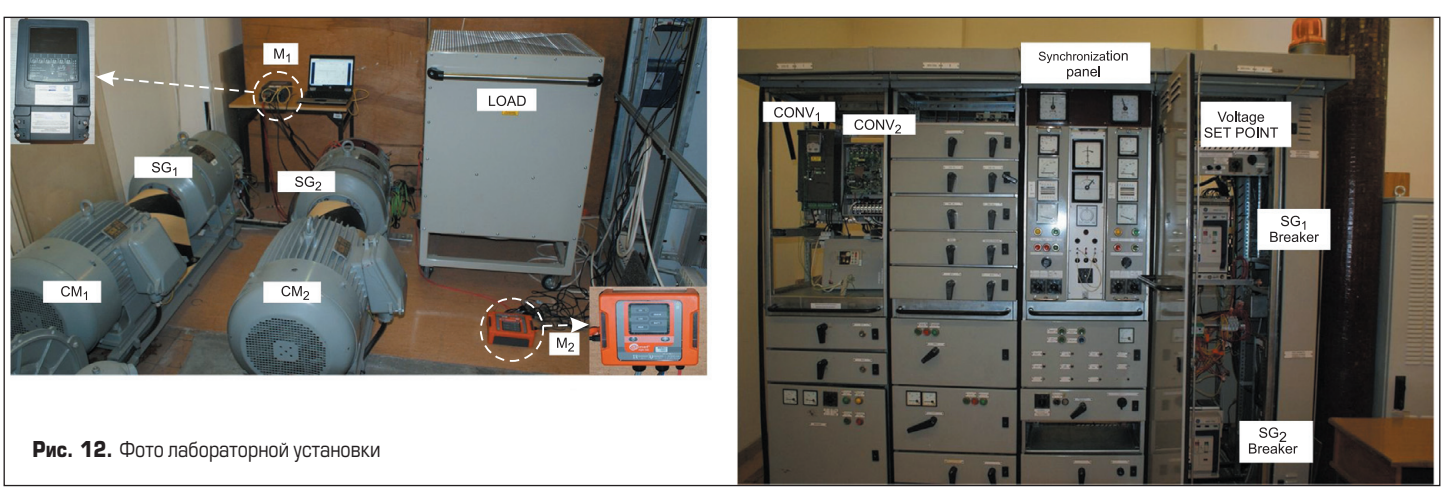

Рис. 12. Фото лабораторной установки

ции обязательных мер, требующих применения отдельной защиты судовых генераторов от потери ими возбуждения. Аналогичные меры защиты необходимо предусматривать и на других подвижных и неподвижных автономных объектах.

Литература

1. Болотин Б. И., Вайнер В. Л. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем. Л. Судостроение, 1974.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. М.: Энергия, 1978.
3. Елистратов В. В. Возобновляемая энергетика. СПб. Изд-во Политехнического университета, 2016.
4. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер. с нем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
5. Константинов В. Н. Синхронизация судовых синхронных генераторов. Теория и методы расчета. Л.: Судостроение, 1978.
6. Савенко А. Е., Голубев А. Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Иваново, 2016.
7. Тимченко В. Ф. Колебания нагрузок и обменной мощности энергосистем. М.: Энергия, 1975.
8. Токарев Л. Н. Математическое описание, расчет и моделирование физических процессов в судовых электростанциях. Л. Судостроение, 1980 г.
9. Ясаков Г. С. Корабельные электроэнергетические системы. Ч. 1. СПб. Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова. 1999.
10. Lloyd's Register. Rules and Regulations for the Classification of Ships; Part 6 Control, Electrical, Refrigeration and Fire, Chapter 2 Electrical Engineering, Section 6 System Design — Protection, 6.8 Protection of Generators. LR, London, UK, 2020.
11. Bureau Veritas. Rules for the Classification of Steel Ships; Part C Machinery, Electricity, Automation and Fire Protection. Chapter 2 Electrical Installations Section 3 System Design 7 Electrical Protection 7.8 Protection of Generators. BV, Paris, France, 2021.
12. PRS Classification Rules Part VIII. In Electrical Installations and Control Systems. PRS, Gdansk, Poland, 2007.
13. DNV GL. Classification Rules; Part 4 Systems and Components Chapter 8 Electrical Installations. DNV GL, Oslo, Norway, 2020.
14. Gazen Y. N., Zarnott A. B., Peres de Morais A., Cardoso G., Oliveira A. New setting of loss of excitation protection in P-Q plan in order to maximize the operation area of the capacity curve of the synchronous machine. Proceedings of the 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj-Napoca, Romania, 2–5 September 2014. IEEE, Piscataway Township, NJ, USA, 2017.
15. López M. D., Platero C. A., Mayor P. L., Granizo R. Review of loss of excitation protection setting and coordination to the generator capacity curve. Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017. IEEE, Piscataway Township, NJ, USA, 2017.
16. Gallas M., Morais A. P., Marchesan, A. C., Cardoso G., Costa G. B. A Comparative Analysis of Loss of Excitation Protection Methods for Synchronous Generators. Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017. IEEE, Piscataway Township, NJ, USA, 2017.
17. Coelho A. L. M., Carrer C. E. B., Guerrero C. A. V., Silveira P. M. Loss-of-excitation protection and underexcitation controls correlation for synchronous generators in a real time digital simulator. Proceedings of the 2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Vancouver, BC, Canada, 5–9 October 2014. IEEE, Piscataway Township, NJ, USA, 2014.
18. Kentli F., Birbir Y., Onat N. Examination of the stability limit on the synchronous machine depending on the excitation current wave shape. Proceedings of the IEMDC 2001 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Cambridge, MA, USA, 17–20 June 2001. IEEE, Piscataway Township, NJ, USA, 2001.
19. Tarnapowicz D., German-Galkin S., Staude M. Investigation Concerning the Excitation Loss of Synchronous Generators in a Stand-Alone Ship Power Plant. Energies, 2021.