

УДК 621.313

Математическая модель судового электротехнического комплекса

А.Е. Савенко

ФГБОУВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
г. Керчь, Республика Крым, Российская Федерация
E-mail: savenko-70@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Современные судовые электротехнические комплексы имеют различную конфигурацию и состоят из большого количества элементов, для каждого из них существуют математические описания. Необходимо объединить имеющуюся информацию и получить математическую модель реального судового электротехнического комплекса для проведения исследований, направленных на устранение обменных колебаний мощности между параллельно работающими дизель-генераторными агрегатами. В математической модели необходимо отразить существование нелинейности «люфт» в контуре управления частотой вращения дизеля в целях выявления причин возникновения обменных колебаний мощности.

Материалы и методы: Используется математическое описание синхронного генератора уравнениями, приведенными к осям, жестко связанным с вращающимся ротором. Дизель вводится в систему уравнений в упрощенной форме, его момент инерции определяется по эмпирической формуле В.П. Терских. Для математического моделирования режимов параллельной работы дизель-генераторных агрегатов в составе судового электротехнического комплекса используются данные автономной дизель-генераторной электростанции переменного тока судна-парома «Ейск».

Результаты: Разработана математическая модель судового электротехнического комплекса, учитывающая нелинейности «люфт» в контурах управления частотами вращения дизелей и позволяющая изменять величины зазоров. Определены входящие в нее коэффициенты для судна-парома «Ейск». Для упрощения моделирования судового электротехнического комплекса генераторные выключатели представлены активными сопротивлениями. Математическая модель реализована с помощью компьютерной программы.

Выводы: Предложенная математическая модель судового электротехнического комплекса позволяет исследовать различные режимы работы автономной дизель-генераторной электростанции переменного тока и выявлять причины возникновения обменных колебаний мощности.

Ключевые слова: колебания мощности, математическая модель, параллельная работа, электротехнический комплекс, синхронный генератор, дизель-генераторный агрегат.

A mathematical model of ship electrical equipment

A.E. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation
E-mail: savenko-70@mail.ru

Abstract

Background: Modern marine electrical equipment complexes have a different configuration and consist of a large number of items, each of them having its own mathematical description. It is necessary to combine the available information and to obtain a mathematical model of a real ship's electrical equipment complex to do research aimed at eliminating power exchange fluctuations between the parallel operating diesel-generator units (DGU). The mathematical model should reflect the existence of non-linearity «play» in the diesel rotation frequency control loop in order to determine the causes of power exchange fluctuations.

Materials and methods: The study is based on a mathematical description of synchronous generator equations reduced to the axes rigidly connected to the rotating rotor. The diesel is introduced into the system of equations in a simplified form; its moment of inertia is determined by V.P. Terskikh's empirical formula. The mathematical modeling of parallel operation of DGU as part of a ship's electrical equipment complex employs data about the stand-alone AC diesel generator power plant of the «Yeysk» ferry-vessel.

Results: We have developed a mathematical model of a ship's electrical equipment complex accounting for «play» nonlinearity in diesel rotation frequency control loops and enabling clearance measurements. We have also determined its constituent factors for the ferry-vessel «Yeysk». For simplicity of a ship's electrical equipment modeling, the generator circuit breakers are represented by active resistances. The mathematical model is implemented in a computer program.

Conclusions: The suggested mathematical model of the ship's electrical equipment complex allows us to investigate different modes of the autonomous AC diesel generator power plant and find out the causes of power exchange fluctuations.

Key words: power fluctuations, mathematical model, parallel operation, electrical equipment complex, synchronous generator, diesel-generator units.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.054-059

Введение. Для проведения исследований параллельной работы дизель-генераторных агрегатов (ДГА) на базе синхронных генераторов в составе электроэнергетической системы ограниченной мощности, анализа причин существующих проблем и поиска методов их устранения использована математическая модель с уравнениями, описывающими работу следующих элементов: синхронных генераторов; систем возбуждения и регуляторов напряжения генераторов; дизелей как тепловых энергетических приводов ДГА; систем управления и стабилизации частоты вращения ДГА; активной и реактивной электрических нагрузок электростанции; устройств коммутации и распределения нагрузки.

Математическое описание синхронного генератора. При анализе симметричных режимов синхронного генератора удобно работать с уравнениями, приведенными к осям, жестко связанным с вращающимся ротором. Синхронную машину можно рассматривать как совокупность обмоток статора и ротора (рис. 1). На продольной оси фиктивной синхронной машины расположены обмотка статора, обозначенная индексом d , демпферная обмотка – Dd и обмотка возбуждения – f , а по поперечной оси расположены обмотка статора, обозначенная индексом q , и демпферная – Dq .

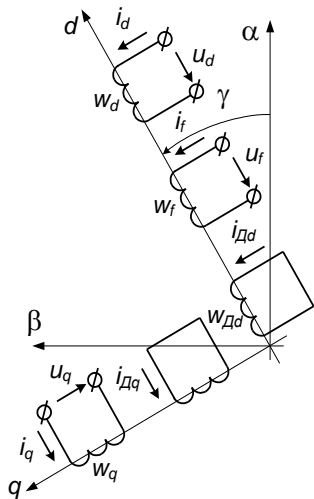


Рис. 1. Схема обмоток СГ в осях d и q ротора

В системе координат осей d и q обмотки статора и ротора синхронного генератора оказываются неподвижными относительно друг друга, а значит, коэффициенты взаимной индукции и индуктивности всех обмоток становятся постоянными величинами. В этом состоит основное преимущество такого представления синхронного генератора.

Полная система уравнений синхронной машины в относительных единицах выглядит следующим образом [1]:

$$\begin{cases} p\Psi_d = -u_d + (1+s)\Psi_q - r_i i_d, \\ p\Psi_q = -u_q - (1+s)\Psi_d - r_i i_q, \\ p\Psi_f = u_f - r_f i_f, \\ p\Psi_{Dd} = -r_{Dd} i_{Dd}, \\ p\Psi_{Dq} = -r_{Dq} i_{Dq}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{Dd}, \Psi_{Dq}$ – потокосцепления обмоток модельного СГ; p – символ дифференцирования; $s = \frac{\omega_r - \omega_s}{\omega_s}$ – величина скольжения для синхронного генератора; ω_r – частота вращения ротора; ω_s – частота напряжения сети;

В выражениях системы (2) индуктивные сопротивления определяются с использованием схемы рис. 2.

$$\begin{cases} \Psi_d = X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_{Dd}, \\ \Psi_q = X_q i_q + X_{aq} i_{Dq}, \\ \Psi_f = X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_{Dd}, \\ \Psi_{Dd} = X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_{Dd} i_{Dd}, \\ \Psi_{Dq} = X_{aq} i_q + X_{Dq} i_{Dq}. \end{cases} \quad (2)$$

В выражениях системы (2) индуктивные сопротивления определяются с использованием схемы рис. 2.

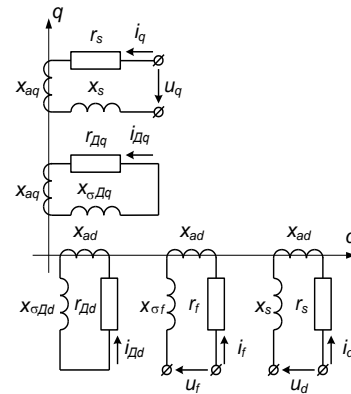


Рис. 2. Развернутая схема обмоток СГ в осях d и q ротора: X_{ad} – сопротивление взаимной индукции обмоток СГ по продольной оси d ; X_{aq} – сопротивление взаимной индукции обмоток СГ по поперечной оси q ; X_s – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора; X_{af} – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения; $X_{\sigma Dd}, X_{\sigma Dq}$ – индуктивные сопротивления рассеяния демпферных обмоток по осям d и q ; r, r_f, r_{Dd}, r_{Dq} – активные сопротивления обмоток СГ

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

$$\begin{aligned} X_d &= X_{ad} + X_s; & X_q &= X_{aq} + X_s; & X_f &= X_{ad} + X_{af}; \\ X_{Dd} &= X_{ad} + X_{\sigma Dd}; & X_{Dq} &= X_{aq} + X_{\sigma Dq}. \end{aligned}$$

Время t измеряется в электрических секундах (1 секунда физическая равна 314 секундам электрическим: $314 = 2 \cdot \pi \cdot f_c = 2 \cdot \pi \cdot 50$).

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

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

где ω_c – круговая частота тока в сети; t – физическое время; γ_0 – начальный угол (при $t = 0$) между осями d и α .

Определение численных значений коэффициентов в уравнениях синхронной машины. Для математического моделирования режимов параллельной работы ДГА в составе судового электротехнического комплекса в качестве примера рассмотрим автономную дизель-генераторную электростанцию переменного тока автомобильного судна-парома «ЕЙСК». Коэффициенты уравнений в относительных единицах определены на основании данных из технических условий генератора типа S450M6: $S_H = 750$ кВА; $P_H = 600$ кВт; $U_H = 400$ В; $I_H = 1100$ А; $n = 1000$ об/мин; $2p = 3$; $r = 0,0027$ Ом; $r_f = 0,177$ Ом; $x_s = 0,075$ о.е.; $x_d = 1,123$ о.е.; $x_q = 0,651$ о.е.; $x'_d = 0,188$ о.е.; $x''_d = 0,133$ о.е.; $x''_q = 0,176$ о.е.; $T_{\text{до}} = 2,28$ с; $T'_d = 0,382$ с; $T''_d = 0,06$ с; $T_a = 0,054$ с.

Тогда система уравнений (1) и (2) для синхронной машины типа S450M6 с полученными численными значениями коэффициентов примет следующий вид:

$$\begin{cases} p\Psi_d = -u_d + (1+s)\Psi_q - 0,0073 i_d, \\ p\Psi_q = -u_q - (1+s)\Psi_d - 0,0073 i_q, \\ p\Psi_f = u_f - 0,0018 i_f, \\ p\Psi_{Dd} = -0,04 i_{Dd}, \\ p\Psi_{Dq} = -0,03 i_{Dq}; \\ \Psi_d = 1,123 i_d + 1,1048 i_f + 1,1048 i_{Dd}, \\ \Psi_q = 0,651 i_q + 0,576 i_{Dq} \\ \Psi_f = 1,1048 i_d + 1,3 i_f + 1,1048 i_{Dd}, \\ \Psi_{Dd} = 1,1048 i_d + 1,1048 i_f + 1,225 i_{Dd}, \\ \Psi_{Dq} = 0,576 i_q + 0,699 i_{Dq}. \end{cases}$$

Возбудитель бесщеточного синхронно-генератора и пропорциональный регулятор напряжения описываются следующим дифференциальным уравнением [2, 3, 4, 5]:

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f(U_0 - u_m)]/T_B,$$

где K_f – коэффициент передачи регулятора, $1 \leq K_f \leq 100$; $u_m = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$; U_0 – задание по напряжению; T_B – постоянная времени возбудителя, $1 \leq T_B \leq 300$.

На основании рекомендаций [2, 3, 4, 5], в математической модели синхронного генератора введено ограничение напряжения

возбуждения $U_{f \min} \leq U_f \leq U_{f \max}$. Верхнее ограничение возбуждения $U_{f \max}$ определяет форсировочные возможности системы регулирования. Величина $U_{f \max}$ зависит от мощности возбудителя и составляет 1,1–2,5 от номинальных значений напряжения. Нижнее ограничение напряжения возбуждения $U_{f \min}$ устанавливается в целях создания магнитного потока, который создает минимально необходимый синхронизирующий момент генератора при параллельной работе.

Уравнения первичных двигателей генераторов и автоматических регуляторов скорости вращения. Регулируемым параметром первичного двигателя как объекта системы автоматического регулирования является скорость вращения вала. К валу двигателя приложены, с одной стороны, момент потерь и момент генератора, с другой – вращающий момент. Регулирующее воздействие двигателя создается рейкой топливного насоса, изменяющей количество энергоносителя, от которого непосредственно зависит вращающий момент первичного двигателя. Приводной двигатель, в качестве которого используется дизель, вводится в систему уравнений в упрощенной форме:

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} = M_d - M_g,$$

$$M_d = K_m h, \quad M_g = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q,$$

где J_m – приведенный момент инерции вала дизеля и ротора генератора; M_d – механический момент дизеля; M_g – электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором; h – положение топливной рейки; K_m – коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Рассмотрим определение момента инерции приводного дизеля и ротора дизель-генераторных агрегатов автомобильного парома «Ейск».

Момент инерции дизель-генераторного агрегата складывается из момента инерции дизеля J и ротора генератора:

$$J_m = i J_{\text{КШМ}} + J_M + J_p,$$

где $J_{\text{КШМ}}$, J_M – приведенные моменты инерции одного кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и маховика, кг·м²; $i = 6$ – количество цилиндров.

Момент инерции $J_{\text{КШМ}}$, кг·м, может быть оценен по эмпирической формуле В.П. Терских [6]:

$$J_{\text{КШМ}} = \frac{1,25 \cdot 10^4 R^3 D \sqrt{b}}{1,4 D \sqrt{b} + R} (k D \sqrt{b} + H d),$$

где $D = 0,2$ м, $d = 0,1495$ м – диаметры цилиндра и шейки коленчатого вала соответственно; $H = 0,32$ м – расстояние между цилиндрами; $b = 1$ – число полостей, приходящихся на одно колено; $R = 0,26$ м – радиус кривошипа коленчатого вала; k – коэффициент, вычис-

ляемый по формуле $k = 0,25L + 0,6D\sqrt{b}$ (для чугунных поршней); $k = 0,38L - 0,17D\sqrt{b}$ (для поршней из алюминиевых сплавов), где $L = 0,535$ м – длина шатуна.

После подстановки получаем:

$$k = 0,25 \cdot 0,535 + 0,6 \cdot 0,2\sqrt{1} = 0,25375 = 0,25;$$

$$J_{\text{кшм}} = \frac{1,25 \cdot 10^4 \cdot 0,26^3 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{1}}{1,4 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{1} + 0,26} \cdot (0,25 \cdot 0,2\sqrt{1} +$$

$$+ 0,32 \cdot 0,1495) = 3,06.$$

Моменты инерции маховика дизеля J_m и ротора генератора J_p оцениваются приближенно как

$$J_m = \frac{1}{2} MR_m^2 = \frac{1}{2} \cdot 525 \cdot 0,92^2 = 222,18 \text{ (кг}\cdot\text{м}^2\text{)},$$

$$J_p = \frac{1}{2} MR_p^2 = \frac{1}{2} \cdot 1500 \cdot 0,34^2 = 86,7 \text{ (кг}\cdot\text{м}^2\text{)}.$$

Таким образом,

$$J_m = 6 \cdot 3,06 + 222,18 + 86,7 = 327,24 \text{ (кг}\cdot\text{м}^2\text{)}.$$

Регулятор частоты вращения дизеля представлен уравнением

$$T_\omega \frac{dh}{dt} = K_\omega \varepsilon - h,$$

где T_ω – постоянная времени исполнительного механизма; K_ω – коэффициент усиления регулятора; ε – сигнал рассогласования между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

Вследствие того, что контуры регулирования частоты вращения ДГА обладают свойством «люфт» (рис. 3), в их уравнения введены его характеристики:

$$\varepsilon = \begin{cases} D_\varepsilon - D_n & \text{при } pD_\varepsilon > 0, \\ D_\varepsilon + D_n & \text{при } pD_\varepsilon < 0, \\ \text{const} & \text{при } |D_\varepsilon - \varepsilon| < D_n, \end{cases}$$

где D_n – значение зазора люфта; D_ε – разность между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

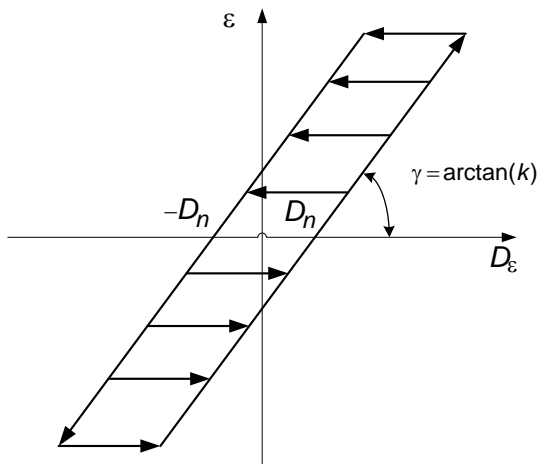


Рис. 3. Характеристика типа «люфт»

Описание нагрузки и ее коммутации.

В математической модели адекватно реальной схеме параллельно включенные синхронные генераторы работают на общую активно-индуктивную нагрузку.

Для преобразования токов статора синхронных генераторов из системы координат (d, q) , жестко связанной с ротором, в неподвижную систему координат (α, β) введены уравнения связи:

$$i_\alpha = i_d \cos \omega_r t - i_q \sin \omega_r t,$$

$$i_\beta = i_q \cos \omega_r t + i_d \sin \omega_r t.$$

Количество электрических генераторов на морском транспортном судне составляет от двух до семи, поэтому моделирование многогенераторной установки сталкивается с большим количеством конфигураций сети включенных и отключенных электроагрегатов.

Количество состояний n генераторных автоматических выключателей с учетом питания с берега составляет 2^{n+1} . Модель каждой конфигурации судовой сети имеет уравнения для токов и напряжений каждого включенного генератора и нагрузки. Для упрощения моделирования многогенераторной установки предлагается представлять состояния генераторных выключателей активными сопротивлениями R_{ki} (рис. 4).

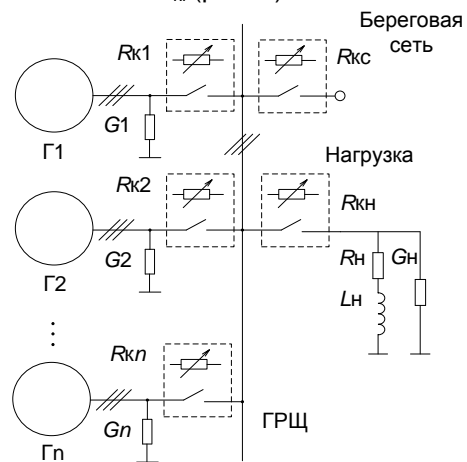


Рис. 4. Типовая схема судовой электростанции

Уравнения, описывающие процессы включения генераторов на параллельную работу, составляются совместно с уравнениями ключей, соединяющих генераторы между собой или с сетью (рис. 5).

В замкнутом состоянии выключатели имеют малое активное сопротивление в десятые доли Ома [7]. В разомкнутом состоянии сопротивление выключателей может быть принято равным нескольким десяткам мОм. В этом случае описание многогенераторной установки представляет одну систему уравнений, а ее конфигурация задается значениями соответствующих сопротивлений R_{ki} .

Например, если i -й генератор подключен к главному распределительному щиту (ГРЩ), то $R_{ki} \rightarrow 0$, а если отключен, то $R_{ki} \rightarrow \infty$.

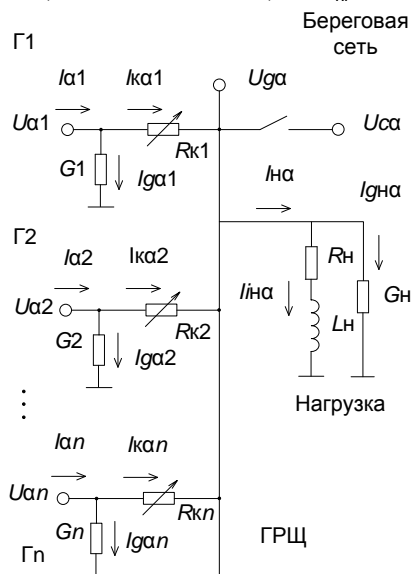


Рис. 5. Расчетная схема судовой электростанции

Уравнения для параметров статорных цепей генераторов, сети и нагрузки в неподвижной системе координат α, β будут иметь следующий вид:

$$I_{\alpha 1} = I_{g\alpha 1} + I_{k\alpha 1}; I_{\alpha 2} = I_{g\alpha 2} + I_{k\alpha 2}; \dots I_{k n} = I_{g\alpha n} + I_{k\alpha n};$$

$$U_{\alpha 1} = I_{k\alpha 1} R_{k1} + U_{g\alpha}; U_{\alpha 2} = I_{k\alpha 2} R_{k2} + U_{g\alpha};$$

$$\dots U_{\alpha n} = I_{k\alpha n} R_{k n} + U_{g\alpha};$$

$$I_{g\alpha 1} = U_{\alpha 1} G_1; I_{g\alpha 2} = U_{\alpha 2} G_2; \dots I_{g\alpha n} = U_{\alpha n} G_n;$$

$$I_{H\alpha} = I_{gH\alpha} + I_{l\alpha}; I_{gH\alpha} = U_{g\alpha} G_H;$$

$$U_{g\alpha} = I_{H\alpha} R_H + L_H \frac{dI_{H\alpha}}{dt},$$

где G_i – проводимость измерительных цепей и утечек изоляции генераторов; G_H, R_H, L_H – параметры нагрузки; R_{ki} – сопротивление выключателей. При питании с берега $U_{g\alpha} = U_{\alpha}$.

Решив систему уравнений относительно напряжений, получим

$$U_{g\alpha} = \frac{(I_{\alpha 1} + I_{\alpha 2} + \dots I_{\alpha i} - U_{\alpha 1} G_1 - U_{\alpha 2} G_2 - \dots U_{\alpha n} G_n - I_{H\alpha})}{G_H};$$

$$U_{\alpha 1} = \frac{I_{\alpha 1} R_{k1} + U_{g1}}{1 + R_{k1} G_1}; U_{\alpha 2} = \frac{I_{\alpha 2} R_{k2} + U_{g2}}{1 + R_{k2} G_2};$$

$$\dots U_{\alpha n} = \frac{I_{\alpha n} R_{k n} + U_{g n}}{1 + R_{k n} G_n}; \frac{dI_{H\alpha}}{dt} = \frac{(U_{g\alpha} - I_{H\alpha} R_H)}{L_H}.$$

Уравнения конфигурации судовой сети совместно с уравнениями дизель-генераторов позволяют получить модель судовой многогенераторной электростанции (рис. 4).

Результаты. Математическое описание всех элементов реальной электростанции (значения или диапазоны изменения параметров) дало возможность составить математическую модель судового электротехнического комплекса [8, 9] и, реализовав ее в компьютерной программе, получить графики мгновенных значений моментов M_{g1}, M_{g2} , токов I_{a1}, I_{a2} , частот вращения роторов ω_{r1}, ω_{r2} , углов нагрузки Tet_1, Tet_2 параллельно работающих генераторов (рис. 6).

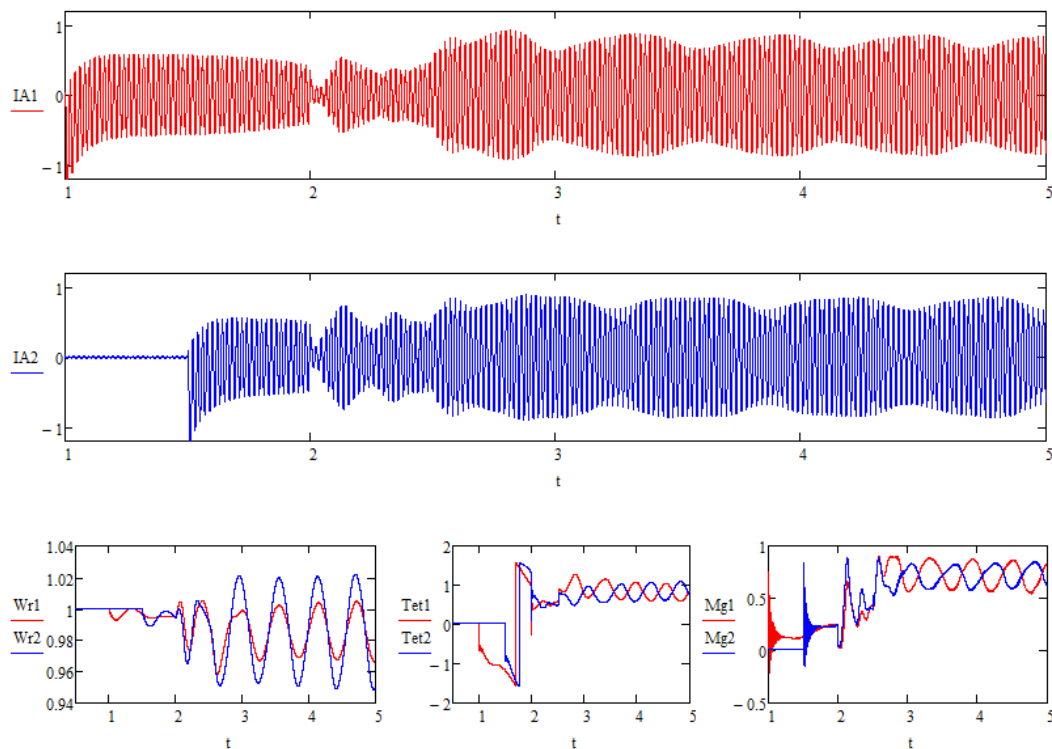


Рис. 6. Результаты моделирования при $D_{n1} = 0,002; D_{n2} = 0,02; K_{\omega 1} = 50; K_{\omega 2} = 50; \omega_{r01} = 1; \omega_{r02} = 1$

На рис. 6 видны колебания мощности в электроэнергетической системе при параллельной работе ДГА, когда максимуму тока одного генератора соответствует минимум тока другого, и наоборот. Обменные колебания – явление своеобразного перехода мощности от одного ДГ к другому с частотой, измеряемой несколькими герцами. Из-за возникновения обменных колебаний мощности между параллельно работающими ДГА переменного тока имеет место проблема обеспечения устойчивой параллельной работы и требуемого качества электроэнергии. Исследования, проведенные с использованием полученной математической модели, показали, что обменные колебания появляются после ввода зазоров люфта D_{n1} , D_{n2} .

Список литературы

1. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 1980. – 176 с.
2. Вишнеvский Л.В., Веретенник А.М., Муха Н.И. Компьютерное моделирование судовых вспомогательных электроустановок // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2001. – № 6. – С. 23–30.
3. Моделирование включения синхронных генераторов в судовую сеть / Л.В. Вишнеvский, А.М. Веретенник, Н.И. Муха, И.П. Козырев // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2006. – Вип. 66. – С. 201–204.
4. Вишнеvский Л.В., Веретенник А.М. Моделирование генераторов переменного тока с различными типами роторов // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2001. – Вип. 57. – С. 50–54.
5. Вишнеvский Л.В., Мироненко В.П. Универсальная математическая модель генератора переменного тока // Изв. вузов. Электромеханика. – 1986. – № 3. – С. 33–40.
6. Ефремов Л.В. Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2007. – 276 с.
7. Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию / Л.В. Вишнеvский, А.М. Веретенник, И.Е. Войтецкий, И.П. Козырев // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2007. – Вип. 68. – С. 26–29.
8. Савенко А.Е. Дослідження суднової електроенергетичної системи порому «Єйськ» // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 85–89.

Савенко Александр Евгеньевич,
ФГБОУВО «Керченский Государственный Морской Технологический университет»,
старший преподаватель кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства,
e-mail: savenko-70@mail.ru

9. Савенко А.Е. Моделирование судовых многогенераторных установок // Материалы XV Междунар. конф. по автоматическому управлению «Автоматика 2008». – Одесса, 2008. – С. 93–95.

References

1. Sipaylov, G.A., Loos, A.V. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1980. 176 p.
2. Vishnevskiy, L.V., Veretennik, A.M., Mukha, N.I. Komp'yuternoe modelirovanie sudovykh vspomogatel'nykh elektrostanovok [Computer simulation of ship auxiliary electrical plants]. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik «Sudovye energeticheskie ustanovki»* [Scientific and technical papers collection «Ship Power Plants»]. Odessa, ONMA, 2001, issue 6, pp. 23–30.
3. Vishnevskiy, L.V., Veretennik, A.M., Mukha, N.I., Kozыrev, I.P. Modelirovanie vlyucheniya sinkhronnykh generatorov v sudovuyu set' [Modeling of synchronous generator connection to a ship's power network]. *Elektromashinobudovannyya ta elektroobladnannyya*, 2006, issue 66, pp. 201–204.
4. Vishnevskiy, L.V., Veretennik, A.M. Modelirovanie generatorov peremennogo toka s razlichnymi tipami rotorov [Simulation of a.c. generators with various types of rotors]. *Elektromashinobudovannyya ta elektroobladnannyya*, 2001, issue, pp. 50–54.
5. Vishnevskiy, L.V., Mironenko, V.P. Universal'naya matematicheskaya model' generatora peremennogo toka [A universal mathematical model of a.c. generator]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1986, no. 3, pp. 33–40.
6. Efremov, L.V. *Teoriya i praktika issledovaniya krutil'nykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniem komp'yuternykh tekhnologiy* [Theory and practice of power plant torsional vibration studies by computer technologies]. Saint-Petersburg, Nauka, 2007. 276 p.
7. Vishnevskiy, L.V., Veretennik, A.M., Voytetskiy, I.E., Kozыrev, I.P. Vlyucheniye sinkhronnykh generatorov v mnogoagregatnyuyu sudovuyu elektrostantsiyu [Switching-on of synchronous generators in a multiunit ship power plant]. *Elektromashinobudovannyya ta elektroobladnannyya*, 2007, issue 68, pp. 26–29.
8. Savenko, A.E. Doslidzhennyya sudnoyi elektroenergetichnoi sistemi poromu «Cys'k» [Research into the ferry-vessel «Yeysk» power system]. *Vistnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu*, 2013, no. 1, pp. 85–89.
9. Savenko, A.E. Modelirovanie sudovykh mnogogeneratornykh ustanovok [Simulation of ship multigenerator plants]. *Materialy XV Mezhdunarodnoy konferentsii po avtomaticheskomu upravleniyu «Avtomatika 2008»* [Proceedings of the XVth International Conference on Automatic Control «Automation 2008»]. Odessa, 2008, pp. 93–95.