

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ПРИВОД-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА

*Ищенко И.М., Вороненко С.В., Данык В.В.
Херсонская государственная морская академия*

На современных судах все более широкое применение находят электроэнергетические системы с валогенераторными установками, что обусловлено такими их достоинствами, как повышение экономичности и надежности судовых энергетических установок, снижение себестоимости вырабатываемой электроэнергии, уменьшение эксплуатационных затрат. При работе установки в качестве аварийного пропульсивного комплекса одна из электрических машин работает в двигательном режиме с постоянной частотой вращения. Вторая машина работает в генераторном режиме, обеспечивая регулирование частоты вращения выходного вала. Для правильного обоснования работы установки необходимо построение математической модели дифференциального привод-генераторного агрегата. В статье рассмотрены системы уравнений синхронных генераторов, движения, полупроводниковых преобразователей, реактора, регуляторов напряжения, частоты и статической нагрузки для дифференциального синхронного привод-генераторного агрегата. В результате исследования авторы пришли к выводу, что разработанная математическая модель может быть использована при разработке и исследовании судовых валогенераторных агрегатов с дифференциальными приводами при их работе как в режиме источника электроэнергии, так и в режиме аварийного пропульсивного комплекса.

Ключевые слова: валогенераторные установки, пропульсивный комплекс, дифференциальный синхронный привод-генераторный агрегат, математическая модель.

Актуальность исследований. На современных судах все более широкое применение находят электроэнергетические системы с валогенераторными установками (ВГУ), что обусловлено такими их достоинствами как повышение экономичности и надежности судовых энергетических установок (СЭУ), снижение себестоимости вырабатываемой электроэнергии, уменьшение эксплуатационных затрат и др. Кроме того, в настоящее время актуальным становится применение в качестве аварийного пропульсивного комплекса ВГУ, работающей в двигательном режиме [1, 2, 3]. В связи с этим определенным интерес представляет использование в качестве ВГУ дифференциально-планетарной генераторной установки, схема которой представлена на рис. 1.

В ходовом режиме судна стабилизация частоты переменного тока установки обеспечивается за счет стабилизации частоты вращения генератора СГ и соответствующего изменения частоты вращения электрической машины ГО (генератора опоры) в зависимости от частоты вращения главного двигателя (ГД).

При работе установки в качестве аварийного пропульсивного комплекса одна из электрических машин работает в двигательном режиме с постоянной частотой вращения (например, СГ). Вторая машина (ГО) работает в генераторном режиме, обеспечивая регулирование частоты вращения выходного вала.

Цель работы – построение математической модели дифференциального синхронного привод-генераторного агрегата.

Актуальность исследований. В процессе разработки таких ВГУ необходимо проведение исследований по выбору типа электрических машин, определению их частот вращения, а также разработок преобразователя электрической энергии (В, I), систем управления, регулирования и защиты. Кроме того, необходимо проведение исследований данных систем в динамических режимах при различных условиях плавания судна. Такие исследования могут быть проведены с помощью математических моделей.

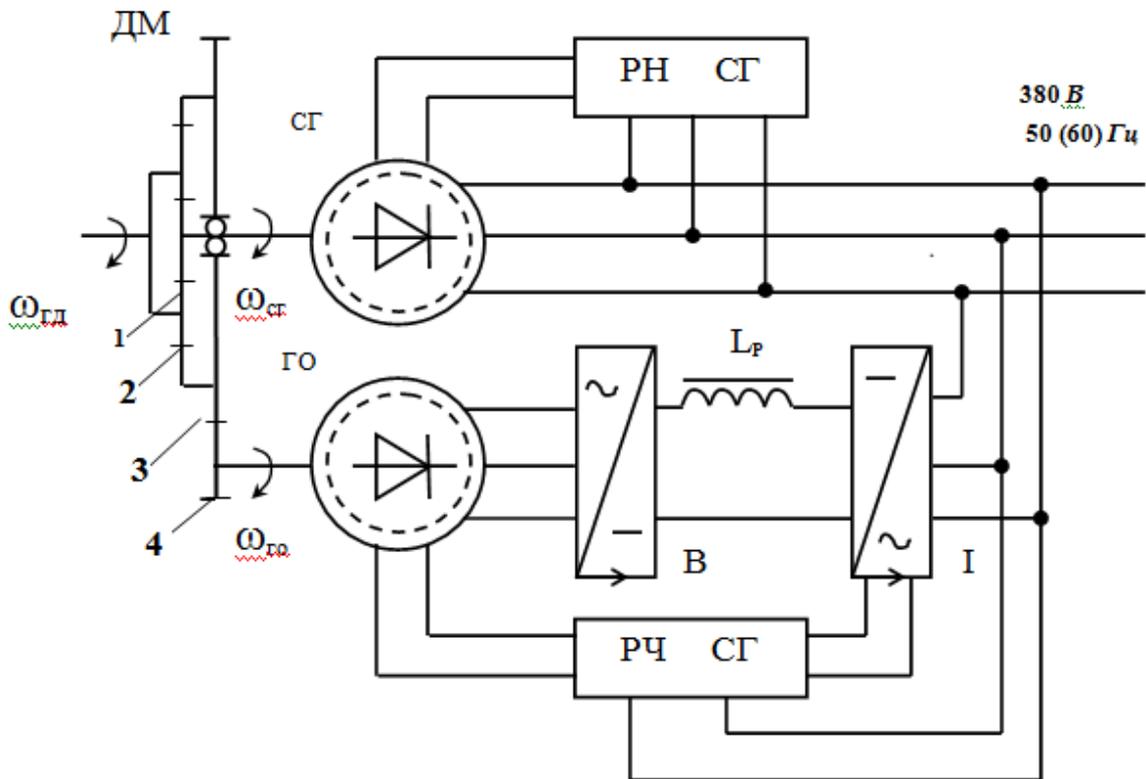


Рисунок 1 – Дифференциально-планетарная генераторная установка

Зная дифференциальные и алгебраические уравнения, описывающие процессы в отдельных элементах генераторного агрегата, составим общую систему уравнений, которой подчинено протекание переходных процессов агрегата. Данные переходные процессы определяются системой уравнений, которая включает в себя:

- уравнение синхронных генераторов – основного и генератора опоры;
- уравнение движения;
- уравнение полупроводниковых преобразователей;
- уравнение реактора (индуктивность, установленная для сглаживания постоянного тока на входе инвертора);
- уравнения регуляторов напряжения и частоты;
- уравнения статической нагрузки;
- уравнения связи.

При составлении данной системы уравнений считаем, что нагрузка на выходе генераторного агрегата статическая и симметричная. Так как длина цепей соединений между отдельными элементами агрегата незначительна, то их параметрами пренебрегаем. Кроме этого принимаем, что основной синхронный генератор и генератор опоры идентичны по конструкции, являются бесконтактными, а на выходе генератора опоры подключен неуправляемый выпрямитель.

Анализ записи дифференциальных уравнений для многомашинных систем показывает, что наиболее целесообразной формой является запись уравнений синхронных машин в осях d , q , θ , жестко связанных с соответствующим ротором каждой электрической машины [4].

Уравнения напряжений в осях $d, q, 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} -u_d = r_d \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_s(1+s)\Psi_q; \\ -u_q = r_q \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_s(1+s)\Psi_d; \\ u_f = r_f \cdot i_f + \frac{d\Psi_f}{dt}; \\ 0 = r_{dk} \cdot i_{dk} + \frac{d\Psi_{dk}}{dt}; \\ 0 = r_{qk} \cdot i_{qk} + \frac{d\Psi_{qk}}{dt}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Уравнения потокосцеплений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_d = \frac{1}{\omega_s} (x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f + x_{adk} \cdot i_{dk}); \\ \Psi_q = \frac{1}{\omega_s} (x_q \cdot i_q + x_{aqk} \cdot i_{qk}); \\ \Psi_f = \frac{1}{\omega_s} (x_{ad} \cdot i_d + x_f \cdot i_f + x_{adk} \cdot i_{dk}); \\ \Psi_{dk} = \frac{1}{\omega_{sk}} (x_{adk} \cdot i_{dk} + x_{adk} \cdot i_{fk} + x_{dk} \cdot i_{dk}); \\ \Psi_{qk} = \frac{1}{\omega_{sk}} (x_{aqk} \cdot i_{qk} + x_{qk} \cdot i_{qk}), \end{array} \right. \quad (2)$$

где u_d, u_q, u_f – напряжения генератора по осям $d, q, 0$ и напряжение возбуждения; i_d, i_q, i_f – токи генератора; $r_d, r_q, r_f, x_d, x_q, x_{adk}, x_{aqk}$ – активные и реактивные сопротивления обмоток генератора; $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{dk}, \Psi_{qk}$ – потокосцепления обмоток генератора; ω_s, ω_{sk} – угловая частота вращения ротора и поля.

Уравнения напряжений, токов и электромагнитного момента можно выразить следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} U = \sqrt{0,5(u_d^2 + u_q^2)}; \\ I = \sqrt{0,5(i_d^2 + i_q^2)}; \\ M_{эм} = \frac{3}{2} P (\Psi_q \cdot i_d - \Psi_{dk} \cdot i_{qk}). \end{array} \right. \quad (3)$$

Уравнения возбудителя синхронного генератора:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{BB} = r_{BB} \cdot i_{BB} + L_{BB} \cdot \frac{di_{BB}}{dt} \\ u_f = m_{uf} \cdot \frac{C_f}{k_u} \cdot i_{BB} \end{array} \right. \quad (4)$$

Уравнение движения запишем для случая постоянной частоты вращения входного вала:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{пр} \frac{d\Omega_1}{dt} = \frac{1}{i_2} M_{эм2} - M_{эм1} \\ \Omega_1 = \frac{\omega_1}{P_1}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Уравнение реактора:

$$U_{\text{Вых вы}} = U_{\text{вхиу}} + r_p I_{\text{вхиу}} + L_p \frac{dI_{\text{вхиу}}}{dt}, \quad (6)$$

где $U_{\text{Вых вы}}$, $U_{\text{вхиу}}$, $I_{\text{вхиу}}$ – соответственно напряжение на выходе выпрямителя генератора опоры, напряжение и ток на выходе зависимого инвертора со стороны постоянного тока; r_p , L_p – активное сопротивление и индуктивность реактора.

Уравнения связи получим на основании анализа совместной работы синхронного генератора и зависимого инвертора. Составляющие токов синхронного генератора, нагрузки и зависимого инвертора равны:

$$\begin{cases} i_{dcr} = i_{dn} + i_{диу}; \\ i_{qcr} = i_{qn} + i_{қиу}. \end{cases} \quad (7)$$

В свою очередь:

$$\begin{cases} i_{диу} = \sqrt{2} I_{иу} \sin(180^\circ - \varphi_{иу} - \theta); \\ i_{қиу} = \sqrt{2} I_{иу} \cos(180^\circ - \varphi_{иу} - \theta). \end{cases} \quad (8)$$

Первая гармоническая тока инвертора со стороны переменного тока определяется как:

$$I_{иу} = \frac{3U_{cr}}{2\pi x_j} \sqrt{\sin^2 \gamma - 2\gamma \sin \gamma \cos(2\beta - \gamma) + \gamma^2}. \quad (9)$$

Соответственно угол сдвига инвертора и углы генератора определяем как:

$$\theta = \arctg \frac{ud}{uq}; \Psi = \arctg \frac{id}{iq}; \varphi = \Psi - \theta; \quad (10)$$

$$\varphi_{иу} = \arctg \frac{\gamma - \cos(2\beta - \gamma) \sin \gamma}{\sin(2\beta - \gamma) \sin \gamma}; \quad (11)$$

$$\gamma = \beta - \arccos \left(\cos \beta + \frac{2x_\gamma I_{вхиу}}{\sqrt{6} U_{cr}} \right) \text{ при } \beta \leq 60^\circ \quad (12)$$

или $\gamma = 60^\circ - \delta$, тогда

$$\delta = 60^\circ - \beta + \arccos \left(\cos \beta + \frac{2x_\gamma I_{вхиу}}{\sqrt{6} U_{cr}} \right) \text{ при } 60^\circ \leq \beta \leq 90^\circ. \quad (13)$$

Решая уравнения (1–13) находим выражение для выходного тока зависимого инвертора:

$$\frac{dI_{\text{вхиу}}}{dt} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{U_2 - U_1 \cos \beta}{L_p} - I_{\text{вхиу}} \frac{\frac{3}{\pi} (x_\gamma + x_{го}) + r_p}{L_p}.$$

Приведенные уравнения, дополненные уравнениями нагрузки, регуляторов частоты и напряжения представляют собой математическую модель дифференциального синхронного привод-генераторного агрегата.

В качестве регулятора напряжения в агрегате целесообразно применить транзисторный регулятор. Транзисторные регуляторы напряжения в настоящее время широко используются в различных системах генерирования электроэнергии переменного и постоянного тока. Транзисторы их исполнительного органа работают в режиме ключа, что позволяет коммутировать относительно большие токи в цепях управления.

Как элементы систем регулирования напряжения транзисторные регуляторы обладают существенно меньшим запаздыванием по сравнению с инерционностью генераторов и по своим динамическим свойствам могут быть отнесены к усилительным

звеньям. В связи с этим, уравнение транзисторного регулятора напряжения обычно представляют в виде:

$$u_B = -k_p \cdot u, \quad (14)$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора.

Так как регулирование (стабилизация) частоты переменного тока агрегата обеспечивается соответствующим изменением тока возбуждения генератора опоры, то в качестве регулятора частоты целесообразно использовать регулятор, аналогичный регулятору напряжения. Измерительным элементом в таком регуляторе может быть применен датчик частоты, основанный на использовании резонанса напряжений или на основе логических элементов.

Регулятор частоты с датчиком на основе логических элементов может быть представлен как усилительное звено:

$$u_{B_{ГО}} = k_f \cdot v, \quad (15)$$

где $u_{B_{ГО}}$ – направление возбуждения генератора опоры; k_f – коэффициент усиления регулятора частоты; $v = \frac{\Delta f}{f}$ – относительное изменение частоты переменного тока агрегата.

Токи нагрузки агрегата и инвертора в осях d , q основного генератора определяются уравнениями:

$$\theta_1 = \arctg \frac{u_{d1}}{u_{q1}};$$

$$i_{d1н} = \sqrt{2} I_H \sin(\varphi_H + \theta_1);$$

$$i_{q1н} = \sqrt{2} I_H \cos(\varphi_H + \theta_1);$$

$$i_{qi} = i_{q1н} - i_{q1};$$

$$i_{di} = i_{d1н} - i_{d1},$$

где θ_1 – угол мощности синхронного генератора; φ_H – угол сдвига между напряжением и током нагрузки; I_H – ток нагрузки агрегата; $i_{d1н}$ и $i_{q1н}$ – токи нагрузки по продольной и поперечным осям генератора; u_{d1} и u_{q1} – напряжения генератора по продольной и поперечной осям; i_{di} и i_{qi} – токи нагрузки по продольной и поперечной осям.

Вывод. Разработанная математическая модель дифференциального синхронного привод-генераторного агрегата может быть использована при разработке и исследовании судовых валогенераторных агрегатов с дифференциальными приводами при их работе как в режиме источника электроэнергии, так и в режиме аварийного пропульсивного комплекса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки / А. В. Григорьев, В. А. Петухов. – С-Пб. : ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2009. – 176 с.
2. Красношапка М. М. Генераторы переменного тока стабильной и регулируемой частоты / М. М. Красношапка. – М. : Техніка, 1974. – 168 с.
3. Марголин Ш. М. Дифференциальный электропривод / Ш. М. Марголин. – М. : Энергия, 1975. – 168 с.
4. Веретенников Л. П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах / Л. П. Веретенников. – Л. : Судостроение, 1975. – 375 с.
5. Осин И. Л. Электрические машины / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. – М. : Высш. шк., 1990. – 304 с.

6. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем / Е. Г. Плахтына. – Львов : Вища шк., 1986. – 164 с.

REFERENCES

1. Grigorjev A. V. Sovremenniye i perspektivniye sudoviye valogeneratoriye ustanovki / A. V. Grigorjev, V. A. Petukhov. – S-Pb. : GMA im. adm. S.O. Makarova, 2009. – 176 s.
2. Krasnoshapka M. M. Generatorih peremennogo toka stabilnoy i reguliruemoy chastotih / M. M. Krasnoshapka. – M. : Tekhnika, 1974. – 168 s.
3. Margolin Sh. M. Differentsialnyy ehlektroprivod / Sh. M. Margolin. – M. : Ehnergiya, 1975. – 168 s.
4. Veretennikov L. P. Issledovanie processov v sudovihkh ehlektroehnergeticheskikh sistemakh / L. P. Veretennikov. – L. : Sudostroenie, 1975. – 375 s.
5. Osin I. L. Ehlektricheskie mashin / I. L. Osin, Yu. G. Shakaryan. – M. : Vihssh. shk., 1990. – 304 s.
6. Plakhtihna E. G. Matematicheskoe modelirovanie ehlektromashinno-ventilnykh sistem / E. G. Plakhtihna. – Ljvov : Vitha shk., 1986. – 164 s.

Ищенко І.М., Вороненко С.В., Даник В.В. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ПРИВІД-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТУ

На сучасних судах все більш широко застосування знаходять електроенергетичні системи з валогенераторними установками, що обумовлено такими їх перевагами, як підвищення економічності та надійності суднових енергетичних установок, зниження собівартості виробленої електроенергії, зменшення експлуатаційних витрат. При роботі установки в якості аварійного пропульсивного комплексу одна з електричних машин працює в руховому режимі з постійною частотою обертання. Друга машина працює в генераторному режимі, забезпечуючи регулювання частоти обертання вихідного вала. Для правильного обґрунтування роботи установки необхідно побудова математичної моделі диференціального синхронного привід-генераторного агрегату. У статті розглянуті системи рівнянь синхронних генераторів, руху, напівпровідникових перетворювачів, реактора, регуляторів напруги, частоти і статичного навантаження для диференціального синхронного привід-генераторного агрегату. У результаті дослідження автори прийшли до висновку, що розроблена математична модель може бути використана при розробці і дослідженні суднових валогенераторних агрегатів з диференціальними приводами при їх роботі як в режимі джерела електроенергії, так і в режимі аварійного пропульсивного комплексу.

Ключові слова: валогенераторні установки, пропульсивний комплекс, диференційний синхронний привід-генераторний агрегат, математична модель.

Ishchenko I.M., Voronenko S.V., Danyk V.V. A MATHEMATICAL MODEL OF A DIFFERENTIAL-DRIVE SYNCHRONOUS GENERATOR SET

In today's courts increasingly are widely used electric power systems with valogeneratornyh installations, due to their advantages such as increased efficiency and reliability of ship power plants, reducing the cost of generated electricity, reducing operating costs. When operating the installation in an emergency propulsion system, one of the electrical machines operates in the motor mode at a constant speed. The second machine is working as a generator, providing regulation of the output shaft speed. The proper study of the plant is necessary to construct a mathematical model of a differential-drive synchronous generator set. The article describes a system of synchronous generators equations of motion, semiconductor converters, reactor, voltage regulators, frequency and static load for a differential-drive synchronous generator set. The study authors have vyvodu that the developed mathematical model can be used in the development and study of marine valogeneratornyh units with differential drives with their work in the electric power source mode or in an emergency propulsion system mode.

Keywords: valogeneratornye installation, propulsion systems, differential-drive synchronous generator machine, mathematical model.

© Іщенко І. М., Вороненко С. В., Даник В. В.

Статтю прийнято
до редакції 20.08.15