

УДК 681.5:621.311

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫМИ СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

В.С. Блинцов

Доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе*

Контактный тел.: (0512) 43-11-74, 095-174-19-27

E-mail: blintsov@mksat.net

Нгуен Тхань Хай

Аспирант*

Контактный тел.: 093-567-62-27

E-mail: thanhchai@mksat.net

*Национальный университет кораблестроения пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина, 54025

Розроблено математичну модель хвильової електроенергетичної системи з двома гідротурбогенераторами, у якій синхронні генератори включено послідовно. Досліджено динаміку такої системи під керуванням спеціального регулятора, який забезпечує синфазне обертання роторів гідротурбін

Ключові слова: генератор, послідовне включення, автоматичне керування

Разработана математическая модель электроэнергетической системы с двумя гидротурбогенераторами, у которой синхронные генераторы включены последовательно. Исследована динамика такой системы под управлением специального регулятора, обеспечивающего синфазное вращение роторов гидротурбин

Ключевые слова: генератор, последовательное включение, автоматическое регулирование

A mathematical model of the electro power system with two hydraulic turbogenerators-synchronous generators, are connected in series. Analysis the dynamics of system with special automatic regulator, that provides in-phase rotation of the rotors of hydraulic turbines

Key words: synchronous generator, connect serially, automatic control

Постановка задачи

Последовательное включение синхронных генераторов (ПВСГ) реализуется путем последовательного соединения их статорных обмоток, в результате чего получают возможность плавного регулирования выходного напряжения от нуля до удвоенного номинального значения путем управления углом между роторами синхронных генераторов (СГ) [1]. Такой режим работы СГ является принципиально неустойчивым и требует синтеза специальных регуляторов их приводных двигателей. Единственным известным авторам примером успешного применения такого включения двух СГ в лабораторных условиях является построение физической модели единой судовой энергетической системы [2].

Актуальность использования ПВСГ сегодня обусловлена интенсивными разработками в области волновой энергетики, где распределенные на водной поверхности низковольтные волновые электрогенерирующие модули необходимо коммутировать между собой на сборных электрических шинах, повышать выходное электрические напряжение волновой электростанции (ВлЭС) и передавать электроэнергию на берег по подводному кабелю [3].

Очевидно, на себестоимость получаемой от такой ВлЭС электроэнергии существенно будет влиять

стоимость повышающих трансформаторов, которые необходимы для снижения потерь в идущей на берег кабельной линии. Установочная мощность этих трансформаторов равна мощности самой ВлЭС, поэтому их исключение из состава электрооборудования электростанции как морского объекта приведет к снижению не только капитальных затрат, но и к уменьшению массогабаритных характеристик ВлЭС и упрощению ее конструкции.

1. Анализ последних исследований и публикаций

Известные исследования установившихся и переходных процессов ПВСГ выполнены для случая, когда первичными двигателями для СГ были судовые дизели или газотурбинные агрегаты, а главной задачей последовательного включения СГ было обеспечение регулирования выходного напряжения системы в широких пределах [1, 2].

Применительно к ВлЭС актуальным является использование в качестве первичных двигателей для СГ гидротурбин, при этом основным режимом работы системы регулирования должен быть режим стабилизации выходного напряжения электростанции [4].

Для практической реализации последовательного включения двух и более генераторов необходимо ре-

шить ряд научных технических задач, к основным из которых относятся:

изучение возможности применения гидротурбин как объектов управления для обеспечения синфазного вращения их роторов;

синтез специальных регуляторов, которые обеспечили бы высокоточное синфазное вращение роторов СГ, которые приводятся во вращение гидротурбинами.

В настоящей работе в качестве первого этапа решения указанных задач выполнено математическое моделирование гидротурбогенераторов как объектов управления, выполнен синтез регулятора синфазного вращения их роторов и методом вычислительного эксперимента исследованы особенности управления такой электроэнергетической системой.

2. Цель работы

Цель работы - разработка математической модели электроэнергетической системы с последовательно включенными синхронными генераторами как объекта управления и проверка ее работоспособности при автоматическом управлении.

3. Изложение результатов исследования

Первым этапом этой работы является разработка математической модели системы «гидротурбина – синхронный генератор» с традиционным регулятором, схема которой представлена на рис. 1.

В данной работе для компьютерного моделирования используется хорошо апробированный программный пакет МАТЛАБ, а также математическая модель гидротурбины, описанная в [5]:

$$\rho L A_L \frac{dv}{dt} = -A_L \rho g (H - H_0),$$

где: v – скорость рабочей жидкости (м/с), L и A_L – соответственно, длина и площадь поперечного сечения напорного трубопровода (м, м²), ρ – плотность рабочей жидкости, g – гравитационное ускорение (м/с²), $\rho L A_L$ – масса рабочей жидкости в канале (кг), $\rho g (H - H_0)$ – разница между статическим давлением столба РЖ и давлением в распределителе.

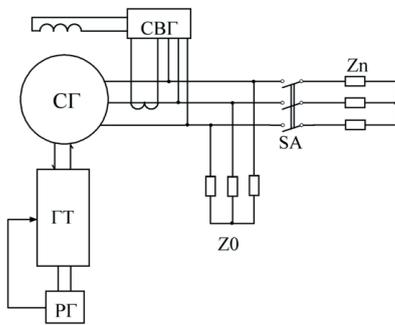


Рис. 1. Структурная схема синхронного генератора с первичным двигателем: СГ – синхронный генератор; СВГ – систем возбуждения генератора; ГТ – гидротурбина; РГ – регулятор

Также в данной статье используется хорошо апробированная в Matlab Simulink математическая модель СГ [6]:

$$p\psi_d = r_i d - (1+s)\psi_q + u_d; \quad p\psi_q = -r_i d + (1+s)\psi_d - u_q;$$

$$p\psi_f = \frac{1}{T_{d0}} u_f - \frac{1}{T_{d0} x_{fs}} (x_f \psi_f + x_{ad} e_{id});$$

$$p\psi_{rd} = \frac{1}{T_{rd} x_{rds}} (x_{ad} e_{id} - x_{rd} \psi_{rd});$$

$$p\psi_{rq} = \frac{1}{T_{rq} x_{rqs}} (x_{aq} e_{iq} - x_{rq} \psi_{rq});$$

$$i_f = \frac{x_f}{x_{fs}} \psi_f - \frac{x_{ad}}{x_{fs}} e_{id}; \quad i_d = -\frac{1}{x_s} \psi_d + \frac{1}{x_s} e_{id};$$

$$i_q = \frac{1}{x_s} \psi_q - \frac{1}{x_s} e_{id};$$

$$e_{id} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{x_{ad}}{x_s} \psi_d + \frac{x_f}{x_{fs}} \psi_f + \frac{x_{rd}}{x_{rds}} \psi_{rd} \right);$$

$$e_{iq} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{x_{ad}}{x_s} \psi_d + \frac{x_f}{x_{fs}} \psi_f + \frac{x_{rd}}{x_{rds}} \psi_{rd} \right);$$

$$\alpha = 1 + x_{ad} \left(\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{rds}} \right); \quad e_{iq} = \frac{1}{\beta} \left(\frac{x_{aq}}{x_s} \psi_q + \frac{x_{rq}}{x_{rqs}} \psi_{rq} \right);$$

$$\beta = 1 + x_{aq} \left(\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{rqs}} \right); \quad ps = \frac{M_M}{T_j} - \frac{1}{T_j} (\psi_d i_q - \psi_q i_d).$$

Все переменные математической модели СГ записаны в относительных единицах: s – скольжение; r – активное сопротивление статора; x_s – реактивное сопротивление рассеяния; $x_{d,q}$ – синхронное реактивное сопротивление по продольной и поперечной осям; x''_q , x''_d – переходное и сверхпереходное реактивное сопротивление по поперечной оси; x'_d , x'_q – переходное и сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси; x_c – реактивное сопротивление системы; $\Psi_{d,q}$ – потокосцепление по продольной и поперечной осям; $\Psi_{rd,rq}$ – потокосцепление успокоительных контуров по продольной и поперечной осям; i_f , Ψ_f – ток и потокосцепление контура возбуждения СГ; $i_{d,q}$, $u_{d,q}$ – токи и напряжения по продольной и поперечной осям; T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения СГ при разомкнутой обмотке статора; T'_d , T'_q – переходная постоянная времени по продольной и поперечной оси; T''_d , T''_q – сверхпереходная постоянная времени по продольной и поперечной осям; T_{rd} , T_{rq} – постоянная времени продольного и поперечного успокоительных контуров; θ – угол между вектором напряжения U и осью q ; δ – угол между синхронной осью и осью q .

Расчет параметров синхронной машины по каталожным данным выполняется с использованием следующих формул [6]:

$$x_{ad} = x_d - x_s; \quad x_{aq} = x_q - x_s; \quad r_f = x_f / (T_d w_0);$$

$$x_f = x_f - (x_{ad}^2 / x_d); \quad r_f = x_f / (T_d w_0);$$

$$x_{rd} = x_{ad}^2 (x_f - 2x_{ad} + x_d - x_d) / [x_f (x_d - x_d) - x_{ad}^2];$$

$$x_{rd} = x_{rd} - (x_{ad}^2 / x_d); \quad x_{rd} = x_{rd} x_d / x_d;$$

$$T_{rd} \gg T_d;$$

$$r_{rd} = x_{rd} / (T_{rd} \omega_0); r_{rq} \gg 1.5 r_{rd};$$

$$x_{rq} = x_{aq}^2 / (x_q - x_q'').$$

Уравнения автоматического регулятора возбуждения СГ:

$$T_e \frac{dE_{qe}}{dt} + E_{qe} = U_p + E_{qe0} + U_\Phi; E_{qe} = \frac{X_{ad}}{R_f} U_p;$$

$$E_{min} < E_{qe} < E_{max};$$

$$\left. \begin{matrix} E_{min} = E_{qemin} \\ E_{max} = E_{qemax} \end{matrix} \right\} \text{если } E_{qmin} < E_q < E_{qmax};$$

$$\left. \begin{matrix} E_{min} = E_{qemin} \\ E_{max} = E_{qemax} \end{matrix} \right\} \text{если } E_q > E_{qmax};$$

$$\left. \begin{matrix} E_{min} = E_{qmin} \\ E_{max} = E_{qemax} \end{matrix} \right\} \text{если } E_q < E_{qmin}.$$

где E_{qe} – напряжение на зажимах обмотки возбуждения; U_p – выходной сигнал от АРВ; E_q – синхронная ЭДС; U_Φ – выходной сигнал от форсировки возбуждения, определяемый из уравнения:

$$T_\Phi \frac{dU_\Phi}{dt} + U_\Phi = V_\Phi.$$

С помощью программы Matlab Simulink проверим достоверность этих математических моделей. Принципиальная схема представлена на рис. 2.

Результаты моделирования приведены на рис. 3. Их анализ показывает, что скорость гидротурбины выходит в номинальный режим через 2.5с и погрешность составляет около 0.5% при 25% набросе и сбросе нагрузки, около 2% при 50% набросе и сбросе нагрузки, и около 3% при 75% набросе и сбросе нагрузки.

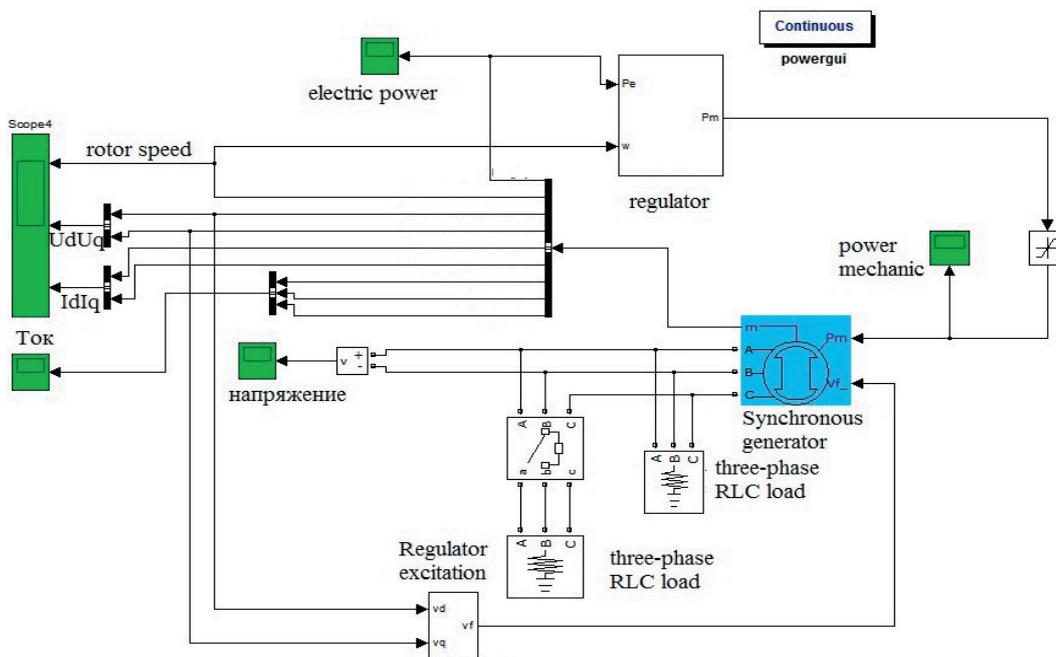
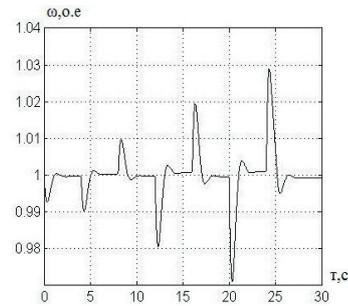
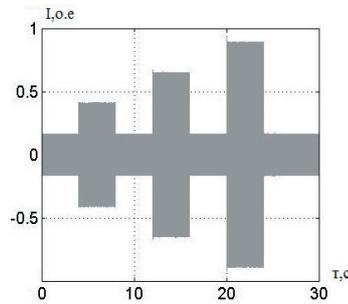


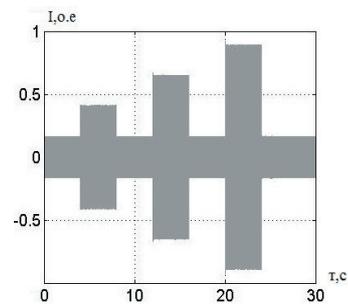
Рис. 2. Принципиальная схема СГ с гидротурбиной



а)



б)



в)

Рис. 3. Результат моделирования в Matlab Simulink: а)

угловая скорость гидротурбины, б) ток системы, в) напряжение системы

Эти результаты практически совпадают с результатами моделирования, полученными авторами статьи [7]. Следовательно, полученные в настоящей статье математические модели гидротурбины и СГ с традиционным регулятором являются достоверными и могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Рассмотрим теперь вопросы создания обобщённой математической модели электромеханической системы с последовательно включенными СГ.

Структурная схема ПВСГ с двумя генераторами 60 кВт, 400 В, 50 Гц представлена на рис. 4.

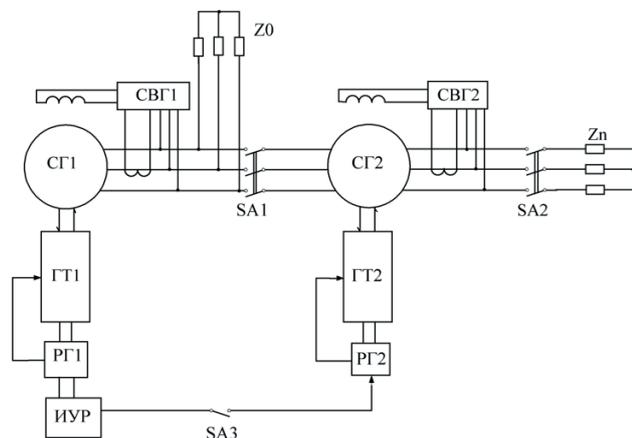


Рис. 4. Структурная схема ПВСГ: СГ1, СГ2 – синхронные генераторы; СВГ1, СВГ2 – системы возбуждения генераторов; ГТ1, ГТ2 – гидротурбины СГ; РГ1, РГ2 – регуляторы гидротурбин; ИУР – измеритель угла рассогласования между роторами гидротурбин

В схеме СГ1 принято называть опорным генератором, а СГ2 принято назвать проходным генератором [2].

Суммарное напряжение на выходе проходного СГ поддерживается специальным регулятором угла между роторами двух гидротурбин и, следовательно, двух синхронных генераторов.

Регулятор РГ1 является традиционным ПД-регулятором, серийно используемым в такого рода установках. Регулятор РГ2 реализует ПИ-закон регулирования, для чего в традиционный ПД-регулятор введен дополнительный канал регулирования по углу рассогласования между углами роторов гидротурбин ГТ1 и ГТ2.

Для регулятора синфазного угла справедливы следующие уравнения:

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1;$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2;$$

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{d\theta_1}{dt} - \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{d\beta}{dt};$$

$$\int (\omega_1 - \omega_2) dt = \theta_1 - \theta_2 = \beta,$$

где ω_1, ω_2 – угловые скорости роторов гидротурбин, о.е.; β – угол рассогласования между роторами турбин.

Уравнение регулятора имеет вид

$$y(t) = k_1(\omega_1 - \omega_2) + k_2(\pi - \beta),$$

где $y(t)$ – управляемый сигнал, k_1, k_2 – коэффициенты управления.

Исполнительными устройствами регуляторов являются сервомоторы, изменяющие положения игл-захлопок, которые регулируют подачу рабочей жидкости в рабочие камеры гидротурбин [8].

Полученная математическая модель электромеханической системы реализована с использованием встроенных библиотек пакета SimPowerSystems (в версии MATLAB 6.1). Схема моделирования системы ПВСГ с двумя СГ мощностью 60 кВт каждый показана на рис. 5.

Моделирование в MATLAB позволяет моделировать переходные процессы ВлЭС с последовательным включением СГ при различных коммутациях, происходящих в системе.

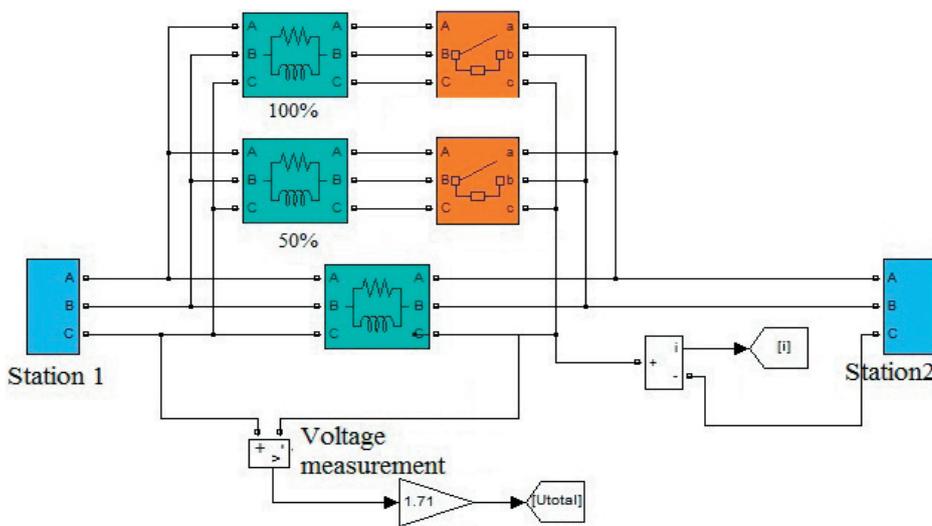
Для проверки достоверности работы модели, рассмотрим работу модели при набросе 70%, 30% и сбросе 30% нагрузки.

Результаты моделирования изменения скорости показаны на рис. 6, а.

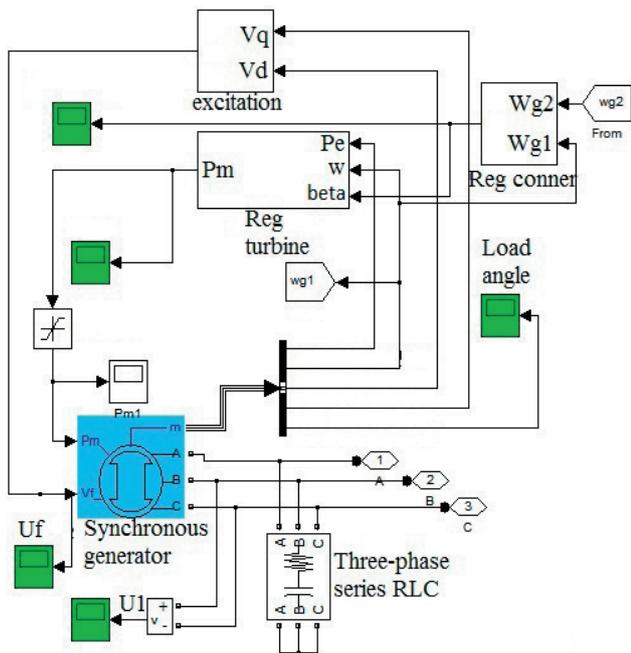
Анализ полученных результатов моделирования подтверждает принципиальную возможность устойчивой работы электрически последовательно включенных синхронных генераторов, приводными двигателями которых являются гидротурбины. При этом, качество управления основными параметрами электроэнергетической системы в переходных процессах невысокое.

Так, длительность переходных процессов в зависимости от величины изменения нагрузки колеблется в пределах 3с, провалы напряжения на выходе системы достигают $\approx 12\%$ при набросе нагрузки 75% и $\approx 6\%$ при набросе 30% нагрузки.

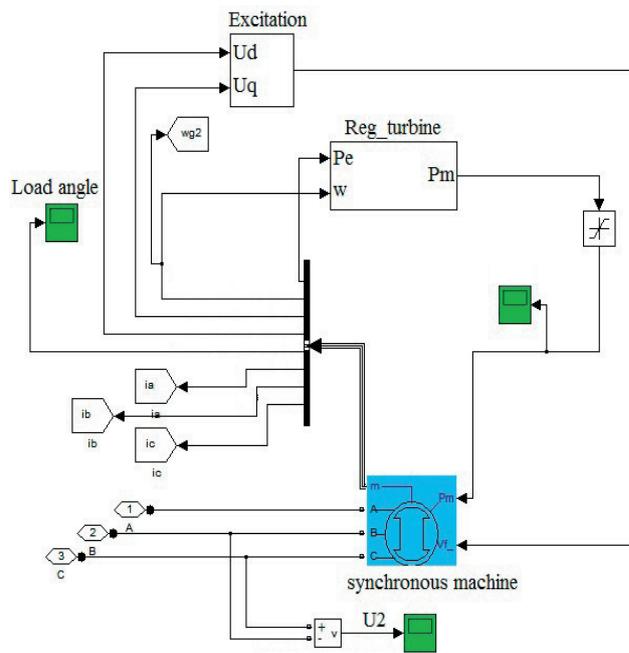
Для большинства режимов работы волновой электростанции такие показатели качества регулирования являются неприемлемыми, что обуславливает необходимость синтеза специальных систем автоматики ВлЭС.



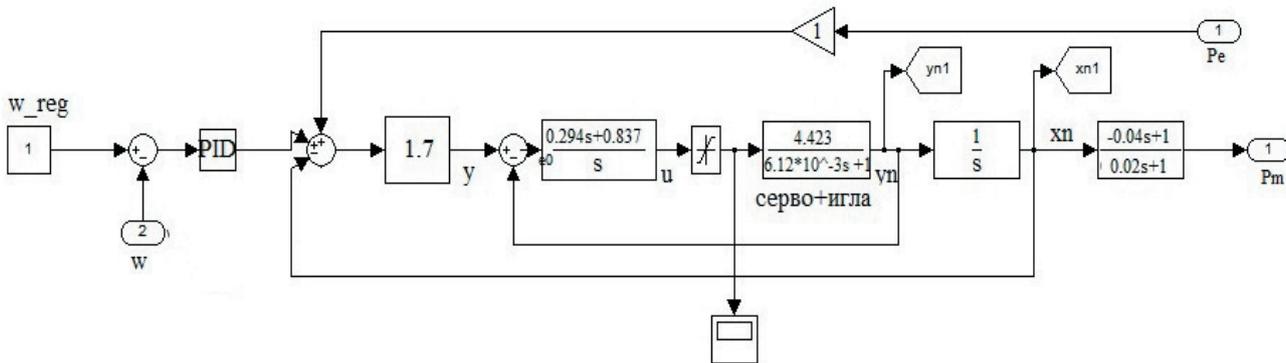
а) Модель ПВСГ с 2 СГ-60К (60 KW, 400В-50Hz)



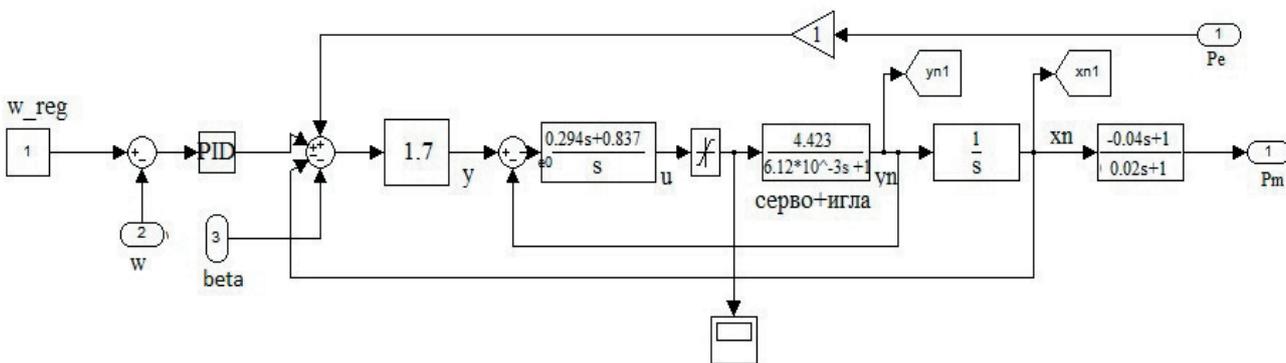
б) Модель первой станции (station 1)



в) Модель второй станции (station 2)

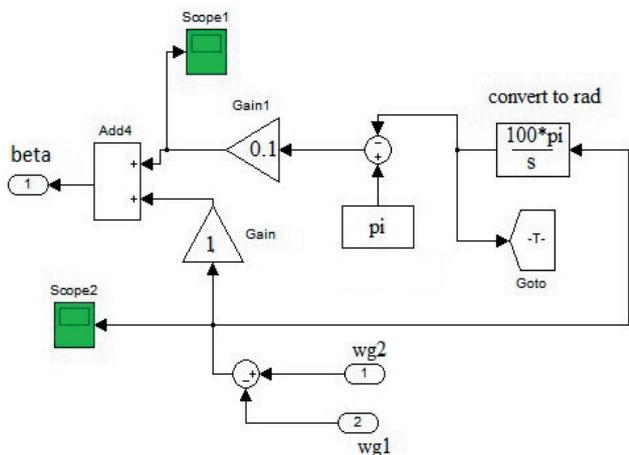


д) схема САР гидротурбины с обратной связи по углу рассогласования



е) схема традиционной САР гидротурбины

4. Выводы



ж) схема САР по углу рассогласования.
Рис. 5. Схема моделирования системы ПВСГ, реализованная в MATLAB

1. Электроэнергетическая система с двумя гидротурбогенераторами, у которой синхронные генераторы включены электрически последовательно, представляет собой устойчиво работающий объект при наличии регулятора одной из гидротурбин, в закон управления которого введен сигнал рассогласования по углу между роторами гидротурбин.

2. Качественное управление электроэнергетической системой, содержащей электрически последовательно включенные синхронные генераторы, при использовании традиционных регуляторов обеспечивает длительность переходных процессов в пределах 3с и провалы напряжения на выходе системы до 12%.

Это не удовлетворяет современным требованиям к качеству электроэнергии и требует синтеза специальных систем регулирования, что является отдельной прикладной научной задачей.

Литература

1. А. с. №306527 СССР. Электрическая установка для судов-электроходов [Текст] / В. В. Краснов, В. С. Михайлов, А. М. Пискунов, К. А. Чекунов; опубл 1971 г. – 3 с.
2. Блинецов В.С. К вопросу о последовательной работе синхронных генераторов [Текст] / В. В. Краснов, А. М. Пискунов // Журн. известия высших учебных заведений –1972. – №9.– С. 9-15.
3. Виссарионов В.И. Использование волновой энергии [Текст] : Учеб, пособие / В. В. Волшаник, Л. А. Золотов – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 144 с.
4. Блинецов В.С. . Автоматизация режимов работы волновой электростанцией [Текст] / Нгуен Тхань Хай // Журн. проблемы автоматизированного электропривода теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – С. 338-339.
5. Kundur P. Power System Control and Stability [Текст] / P. Kundur – М : EPRI-Power System Engineering Series McGraw-Hill Inc., USA, 1994. – 1199 с.

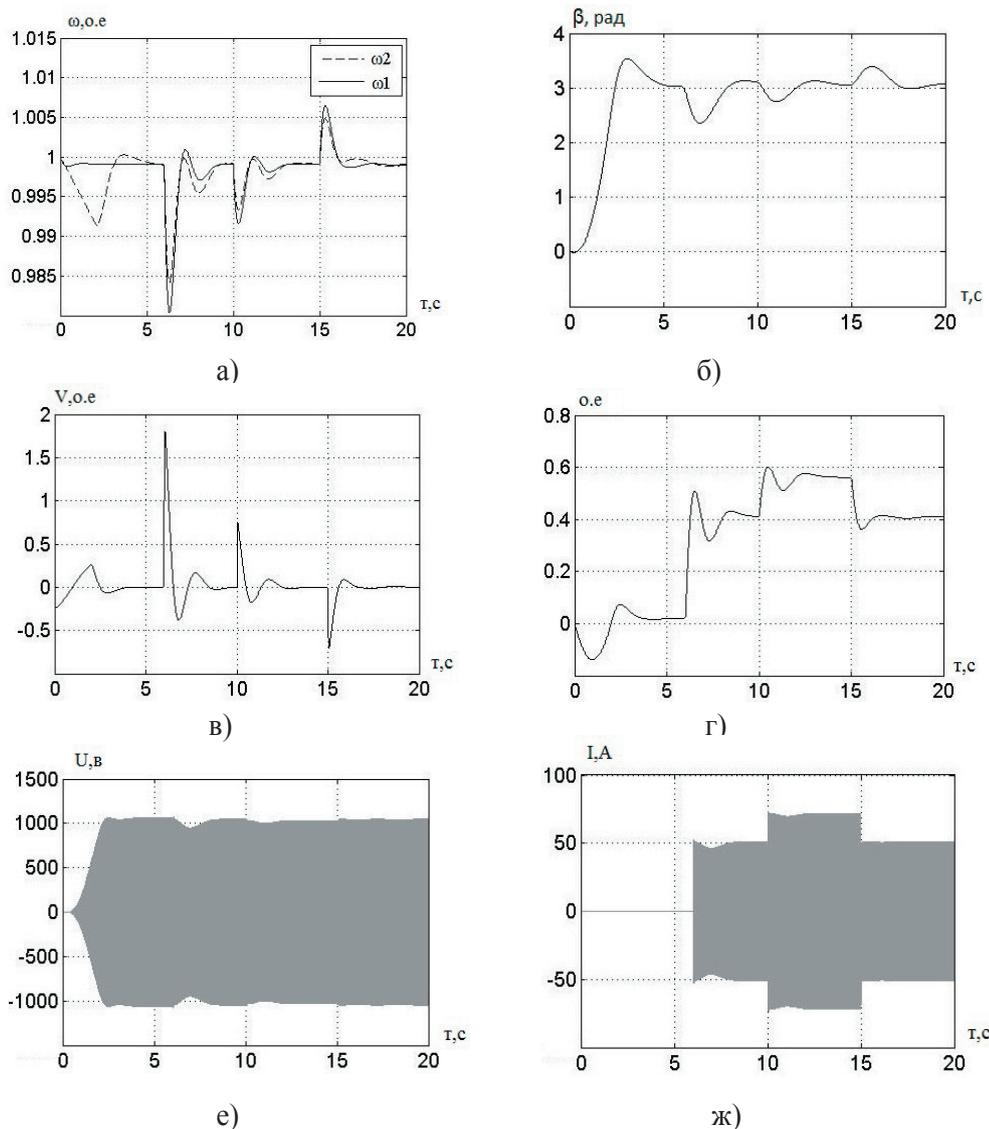


Рис. 6. Результат моделирования работы системы: а – переходный процесс изменения угловых частот вращения роторов гидротурбин; б – изменение угла рассогласования между роторами; в – скорость перемещения иглы; г – перемещение иглы; е – выходное напряжение системы ПВСГ; ж – ток нагрузки системы ПВСГ

6. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя [Текст] / В. П. Дьяконов – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 768 с.
7. American Control Conference: Turbine Speed Control for an Ocean Wave Energy Conversion System [Текст]: тез. докл. науч.-практ. конф. (июнь, 2009). – Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA: 2009. – С. 2749 - 2754
8. Гуськова В.В. Гидро-пневмо-автоматика и гидропривод мобильных машин [Текст] / Учеб пособие / В. В. Гуськова. – М.: Минск «Высшая школа», 1987. – 310 с.

Запропоновано підхід до вирішення деяких систем диференціальних рівнянь, що описують корозійний процес, заснований на використанні штучних нейронних мереж

Ключові слова: нейронна мережа, агресивне середовище, системи диференціальних рівнянь, кородуюча конструкція, коррозія

Предложен подход к решению некоторых систем дифференциальных уравнений, описывающих коррозионный процесс, основанный на использовании искусственных нейронных сетей

Ключевые слова: нейронная сеть, агрессивная среда, системы дифференциальных уравнений, корродирующая конструкция, коррозия

The approach to the decision of some systems of the differential equations describing corrosion process, based on use of artificial neural networks is offered

Keywords: neural network, aggressive environment, systems of differential equalizations, corrodible construction, corrosion

УДК 624.046.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Л. И. Короткая

Ассистент

Кафедра компьютерных технологий и высшей математики

Украинский государственный химико-технологический университет

пр. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, Украина, 49005

Контактный тел.: (0562) 47-24-64

E-mail: korliv@hotmail.com

1. Введение

При проектировании конструкций необходимо учитывать, что их элементы могут подвергаться воздействию не только механических нагрузок, но и различных агрессивных сред (АС) [1]. За последние десятилетия проблемам моделирования поведения конструкций, эксплуатирующихся в АС, и оптимального проектирования уделяется значительное внимание. Несмотря на широкий интерес, многие вопросы не получили должного освещения и далеки от завершения. Известные подходы решения указанного класса задач имели существенные недостатки [2].

Среди конструкций, эксплуатирующихся в АС, особое место занимают шарнирно-стержневые систе-

мы (ШСС) (фермы). В данной работе предлагается использование нейронных сетей при моделировании процесса деформирования и разрушения таких систем в АС.

В работе будут рассмотрены статически неопределимые ШСС в условиях сильноагрессивных сред, когда механические напряжения оказывают существенное влияние на скорость коррозионного процесса.

2. Постановка задачи

Математическая модель деформирования конструкции в АС будет включать в себя: