

УДК 621.548:681.5

А.М. СУББОТА, Д.А. ГАЕВАЯ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

БУДУЩЕЕ ЭНЕРГЕТИКИ – АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Проведен обзор литературных источников и анализ возможных путей развития установок, основанных на базе использования альтернативных источников энергии – солнечной, ветровой, геотермальной, приливной и т.д. С точки зрения управления проведен анализ качества функционирования ветроэнергетической установки (ВЭУ) Н-типа в условиях изменяющихся значений ветрового потока, нагрузки и углов установки лопастей. Получена математическая модель объекта управления ВЭУ вертикально-осевого типа и определены коэффициенты передаточной функции объекта для ветроустановки Н-типа мощностью 100 кВт. Представлены схема и результаты машинного моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK, и определены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: «лежачий полицейский», преобразователь волновой энергии в электрическую, солнечная батарея, ВЭУ поплавкового типа, ветрогидроустановка, ВЭУ Н-типа, система управления, угол поворота, ротор, электрогенератор.

Введение

Проблемы энергетики сегодня стоят очень остро во всем мире и затрагивают даже экономически сильно развитые страны. Традиционные направления развития энергетики на базе органического топлива, гидроэнергетики, атомной энергетики в силу своего влияния на экологию и безопасность жизнедеятельности человечества постепенно сдают свои позиции как основные и единственные источники энергии. В настоящее время достигнуты большие успехи в развитии энергетики на базе использования солнечной энергии, ветровой, геотермальной, приливной и т.д.

Анализ путей развития альтернативных источников энергии

Анализ литературных и патентных источников показывает, что появляются системы, которые одновременно используют: энергию солнца и воды; воды и ветра; солнца, ветра и органического топлива и т.д. [1]. Кроме того заслуживают должного внимания и системы, которые используют не только, например, возникновение ветрового потока за счет движения транспортных средств, но и сами транспортные средства. В качестве примера рассмотрим идею создания безопасного «лежачего полицейского», работающего в режиме самообслуживания в условиях плохой видимости на дороге или в ночное время (рис. 1) [2].

Как видно из рис. 1, принцип действия такой энергетической системы заключается в возвратно-поступательном перемещении постоянного магнита, связанного с телом «лежачего полицейского», отно-

сительно неподвижной катушки. Для увеличения к.п.д. система настраивается на резонанс и после переезда «лежачего полицейского» транспортным средством возникшие автоколебания позволяют увеличить продолжительность выработки электроэнергии для заряда аккумуляторных батарей (АКБ).

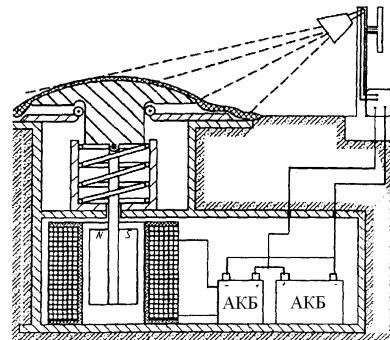


Рис. 1. Схема «лежачего полицейского»

В условиях плохой видимости или в ночное время автоматика подключает к аккумуляторам прожекторы для освещения места положения «лежачего полицейского», а также табло, предупреждающее водителя о необходимости снижения скорости движения. Такого типа «лежачие полицейские» могут найти широкое применение на дорогах с интенсивным движением, расположенных, например, вблизи школ и больниц.

При движении транспортных средств по скоростным магистралям создается вдоль обочин значительный ветровой поток, который может быть использован для повышения интенсивности работы ветроэнергетической установки (ВЭУ). Данная ВЭУ может быть использована как автономный источник

электрообеспечения придорожных кафе, ремонтных и заправочных станций и т.д.

Аналогично «лежачему полицейскому» может быть построен преобразователь энергии волн в электрическую энергию (рис. 2).

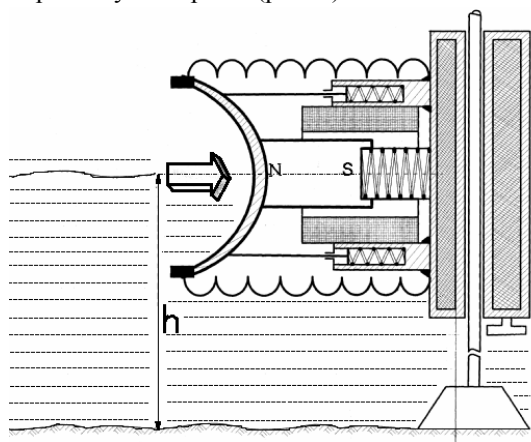


Рис. 2. Преобразователь волновой энергии в электрическую

Особенностью данного преобразователя является автоматическая подстройка положения волноприемника на изменяющийся уровень воды (h). Принцип действия установки заключается в возвратно-поступательном движении постоянного магнита (аналогично схеме «лежачего полицейского»), соединенного с центральной частью волноприемника, относительно статора. Основные элементы электрогенератора размещены в герметичном упругом корпусе в виде упругого гофрированного кожуха, соединяющего волноприемник и поплавковую камеру. Камера свободно перемещается в вертикальной плоскости и принимает положение, соответствующее уровню воды в данный момент времени. Таким образом, центральная часть волноприемника всегда подстраивается под уровень воды за счет перемещения поплавковой камеры.

Далее рассмотрим установку, основанную на базе солнечной батареи 1, которая преобразует солнечную энергию в электрическую (рис. 3) [3].

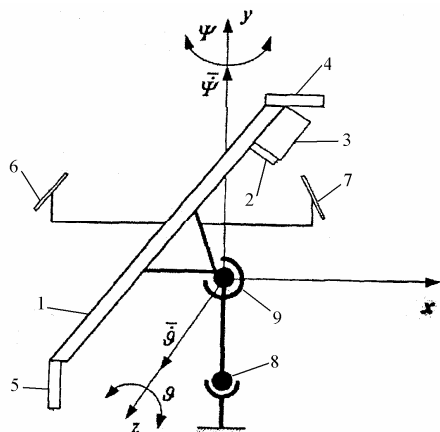


Рис. 3. Солнечная энергетическая установка

Особенностью данной установки является наличие в системе трех каналов управления: азимутально-го (датчики автоматической системы позиционирования данного канала на базе фотоэлементов 2 и 3), зенитального (4 и 5) и обратной связи (6 и 7), служащей для возврата установки в исходное состояние, соответствующее положению солнца в утреннее время. Установленные фотоэлементы улавливают солнечные лучи, затем разностный сигнал поступает на двигатели по азимутальному (8) и зенитальному (9) каналах, которые в свою очередь разворачивают установку на необходимый угол, что позволяет ей «следить» за Солнцем. Рассматриваемая солнечная установка может быть использована как передвижная солнечная электростанция, что достигается путем установки ее на передвижном прицепе.

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время распространены системы управления ветроэнергетической установкой (ВЭУ) пассивного и активного типов. В системах управления пассивного типа к лопастям ветроустановки конструктивно присоединяются дополнительные аэродинамические поверхности, положение которых относительно оси вращения определяется моментом инерции, что собственно и обуславливает регулировку угловой скорости вращения ротора ВЭУ.

Системы управления активного типа отличаются наличием аналогового или цифрового регулятора, позволяющего в зависимости от скорости ветра, нагрузки и угловой скорости вращения ротора (якоря) электрогенератора поддерживать постоянство скорости вращения ротора ВЭУ и тем самым обеспечивать высокое качество электрической энергии с точки зрения параметров напряжения и частоты.

Развитие ВЭУ идет по пути увеличения мощности, что связано в первую очередь с увеличением габаритов, с другой стороны – по пути усовершенствования самой конструкции ВЭУ, особенно это касается ВЭУ с вертикальной осью вращения, у которых основным недостатком является значительная нагрузка на нижнюю опору, что приводит к увеличению момента трения и как следствие к ее быстрому изнашиванию и частой замене. С целью исключения этого недостатка предлагается верхнюю и нижнюю опоры выполнять поплавкового типа (рис. 4) [4].

Данная ветроустановка представляет собой вертикальную опору с лопастями, верх и низ которой закреплены на своеобразных поплавках. Нижняя опора в виде поплавка находится в жестко закрепленном полом цилиндра, заполненного жидкостью. Верхняя опора, в свою очередь, представляет собой аналогичный цилиндр с жидкостью, внутри которого располагается поплавок, непосредственно связанный с растяжками. Обе опоры позволяют ВЭУ свободно вращаться относительно вертикальной оси.

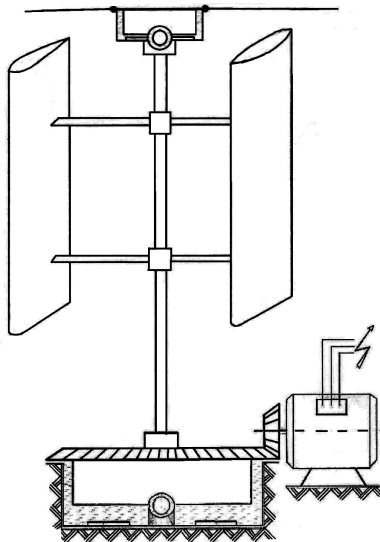


Рис. 4. Ветроэнергетическая установка поплавкового типа

При соответствующем подборе плотности жидкости и средней плотности материала, из которого выполнены элементы ВЭУ, можно создать подъемную силу, уравновешивающую силу тяжести ВЭУ и тем самым исключить полностью сухое трение в опорах подвесов. С другой стороны такая конструкция опор позволяет демпфировать резкие порывы ветра и не допускать вследствие этого значительных ускорений конструкции ВЭУ. Следовательно, данная система подвесов обеспечивает значительную долговечность всей системы.

Западные районы Украины характеризуются наличием, как водных ресурсов, так и большим ветровым потенциалом. Учитывая это, целесообразно применять установки, использующие энергию ветра и воды одновременно (рис. 5) [5].

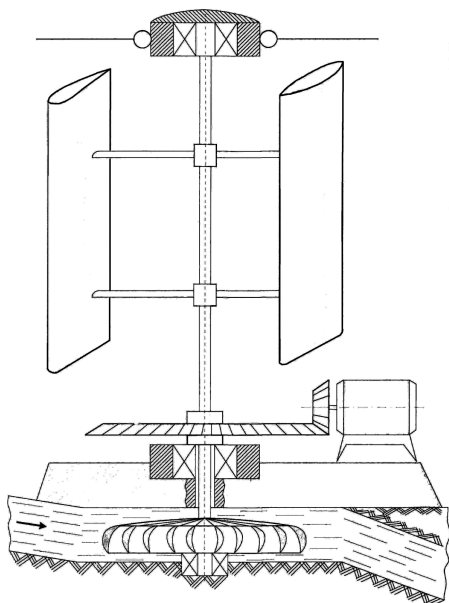


Рис. 5. Ветрогидроустановка

Особенностью данной установки является возможность запуска ВЭУ не с помощью генератора в двигательном режиме, а с помощью гидроустановки.

Главным достоинством такой ветрогидроустановки является то, что при пиковых режимах нагрузка компенсируется за счет ВЭУ.

В качестве примера совместного использования нескольких видов возобновляемой энергии рассмотрим передвижную автономную электростанцию, использующую кроме энергии ветра и энергии солнца, механическую энергию двигателя внутреннего сгорания (рис. 6) [6].

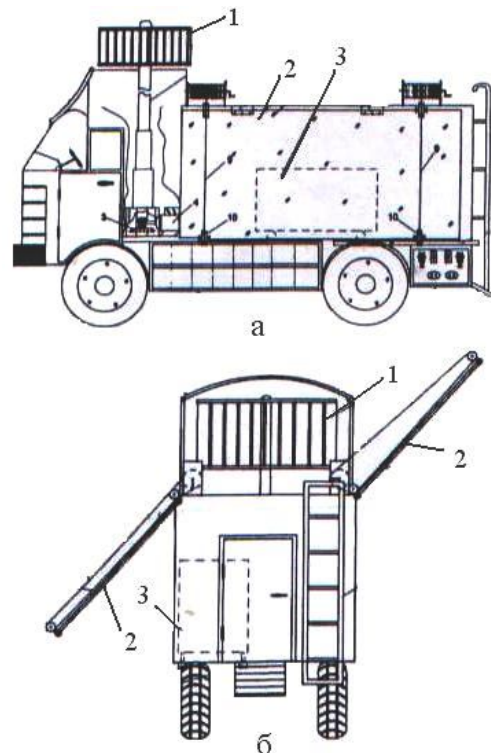


Рис. 6. Передвижная автономная электростанция: а – вид сбоку, б – вид сзади

Данная электростанция содержит ветроэнергетическую установку (1), установку на базе панелей солнечных батарей (2), расположенных на боковых поверхностях кузова, а также установку производства электроэнергии на базе двигателя внутреннего сгорания (3), расположенного внутри кузова автомобиля. Такое сочетание преобразователей энергии позволяет бесперебойно обеспечивать электрической энергией потребителей, которые могут изменять свое положение и временно находиться в отдаленных от населенных пунктов и в труднодоступных местах.

Остановимся на преобразовании энергии ветра в электрическую и более подробно рассмотрим особенности управления ВЭУ. Одним из возможных способов поддержания постоянства угловой скорости ротора ВЭУ является изменение угла поворота (угла атаки) лопасти относительно оси вращения.

Известна система управления ВЭУ с поворотными лопастями, реализующая закон управления, который учитывает одновременно значения скорости ветра, нагрузки, угла и скорости поворота лопасти в данный момент времени (рис. 7).

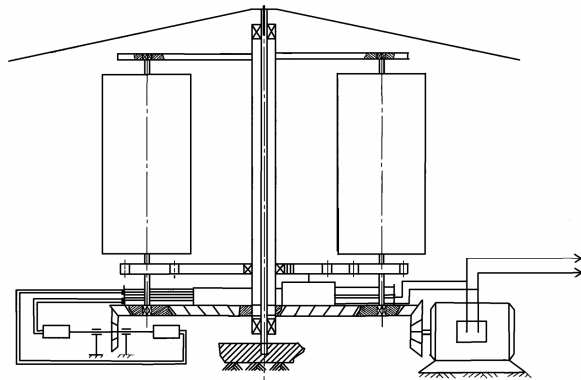


Рис. 7. Ветроэнергетическая установка Н-типа с поворотными лопастями

Особенностью данной системы является наличие в ней исполнительного двигателя для поворота лопастей относительно оси вращения на определенный угол в зависимости от параметров ветра. Это позволяет поддерживать постоянную скорость вращения ротора ВЭУ и тем самым – постоянную угловую скорость вращения электрогенератора, рабо-

тающего на сеть. При максимальном значении скорости ветра двигатель переводит лопасти во флюгерное состояние, что способствует снижению нагрузки на всю конструкцию ВЭУ в целом. В свою очередь, закон управления, учитывающий также изменение нагрузки с учетом изменения скорости ветра, позволяет поддерживать с высокой степенью точности угловую скорость вращения ротора ВЭУ.

Анализ динамики ВЭУ с поворотными лопастями

Рассмотрим особенности управления угловой скоростью вращения ВЭУ, представленной на рис. 7. На подвижном основании размещается барабан с необходимым количеством токопроводящих дорожек, которые обеспечивают передачу энергии и необходимой информации для реализации связи наземной аппаратуры (источников питания, датчиков угловой скорости и ускорения ВЭУ, анемометров и датчиков нагрузки) с элементами системы управления, находящимися на подвижном основании (двигателем, микроконтроллерным вычислителем, датчиками угла и угловой скорости поворота лопасти).

Функциональная схема объекта управления приведена на рис. 8.

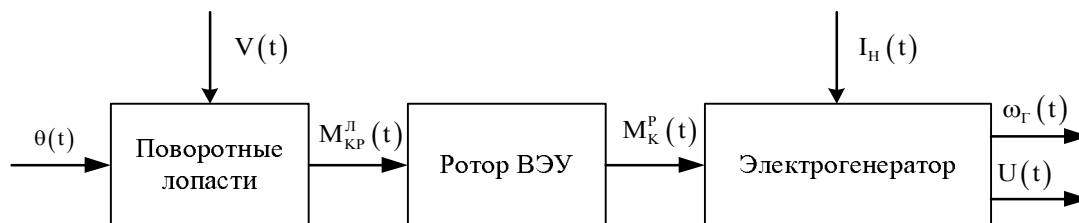


Рис. 8. Функциональная схема объекта регулирования

На рис. 8 приняты следующие обозначения:

$V(t)$ – скорость ветра;

$\theta(t)$ – угол поворота лопасти относительно оси вращения;

$M_{кр}^л(t)$ – крутящий момент, создаваемый лопастью;

$M_{кр}^р(t)$ – суммарный крутящий момент, создаваемый ротором ВЭУ;

$\omega_r(t)$ – угловая скорость вращения ротора электрогенератора;

$I_H(t)$ – ток нагрузки электрогенератора;

$U(t)$ – напряжение на выходе генератора.

Согласно [7], уравнение динамики (1) и структура объекта регулирования имеют вид (рис. 9):

$$(Ts + 1)\Delta\bar{\omega}(s) = R_1\Delta\bar{V}(s) + R_2\Delta\bar{\theta}(s) + R_3\Delta\bar{I}_H(s). \quad (1)$$

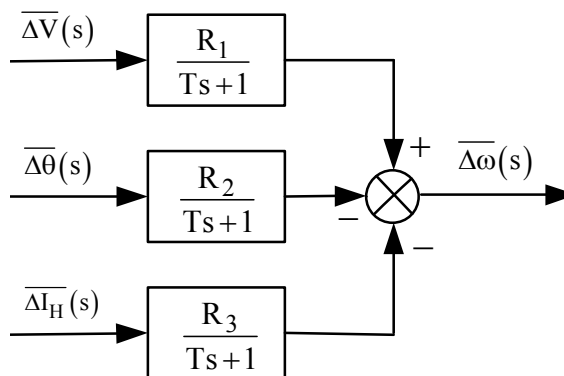


Рис. 9. Структурная схема объекта регулирования

Особенностью объекта регулирования является наличие трех входных переменных.

В данной статье рассмотрено активное управление выходными параметрами ВЭУ путем изменения угла поворота лопастей.

Угловая скорость вращения ротора ВЭУ зависит от скорости ветра, угла поворота лопасти и нагрузки на генераторе. Следовательно, при изменении ветра и нагрузки, варьируя углом поворота лопасти можно обеспечить постоянство угловой скорости ротора ВЭУ.

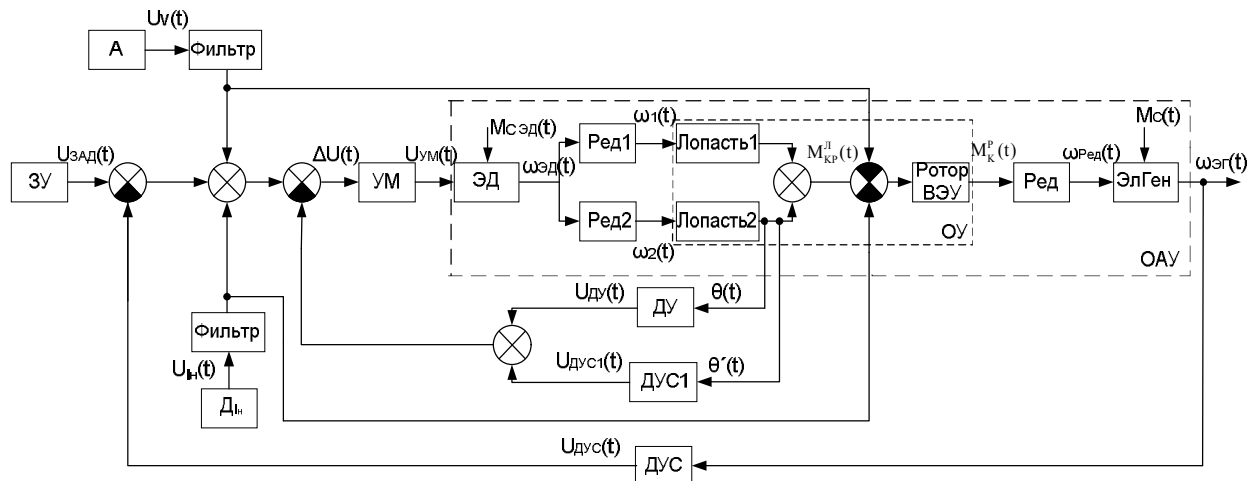


Рис. 10. Функциональная схема системы управления ВЭУ

На рис. 10 введены следующие обозначения:

ЗУ – задающее устройство выходной угловой скорости электрогенератора;

УМ – усилитель мощности;

ЭД – электродвигатель;

Ред1, Ред2, Ред – редукторы;

ЭлГен – электрогенератор;

ДУ – датчик угла поворота лопасти;

ДУС1 – датчик угловой скорости поворота лопасти;

ДУС – датчик угловой скорости генератора;

А – анемометр;

Д1 – датчик нагрузки.

В данную систему, в отличие от классической, которая имеет одну обратную связь по угловой скорости вращения электрогенератора, введены еще две дополнительные обратные связи по углу поворота и угловой скорости поворота лопасти, что значительно повышает быстродействие и точность системы.

Моделирование системы управления ветроэнергетической установкой в среде MATLAB/SIMULINK

Рассмотрим систему управления ВЭУ с вертикальной осью вращения мощностью 100 кВт.

На рис. 10 приведена функциональная схема системы управления, в которой использован данный принцип. На основании информации с датчиков о величине текущих параметров формируется управляющий сигнал для исполнительного механизма, в роли которого выступает электродвигатель, который поворачивает лопасть на требуемый угол для обеспечения заданной угловой скорости вращения электрогенератора.

Начальный угол установки лопастей $\theta_0 = 10^\circ$, рабочая скорость ветра $V_0 = 8$ м/с. Угловая скорость вращения ротора ВЭУ $\omega_0 = 12,5$ рад/с.

На рис. 11 приведена зависимость коэффициента мощности от быстроходности для разных типов ветроустановок. Выбираем рабочую точку для ВЭУ данного типа (4 – установка Дарье) – это точка с быстроходностью 5 и $C_{P0} = 0,37$. Согласно [6] определены коэффициенты уравнения (1) объекта управления $R_1 = 1,41$, $R_2 = 0,016$, $R_3 = 0,24$ и постоянная времени $T = 0,3$ с.

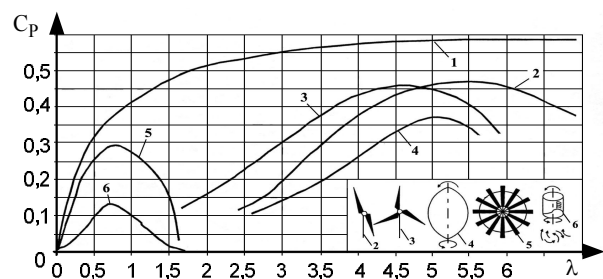


Рис. 11. Зависимость коэффициента мощности C_p от быстроходности

На рис. 12 приведена схема моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK.

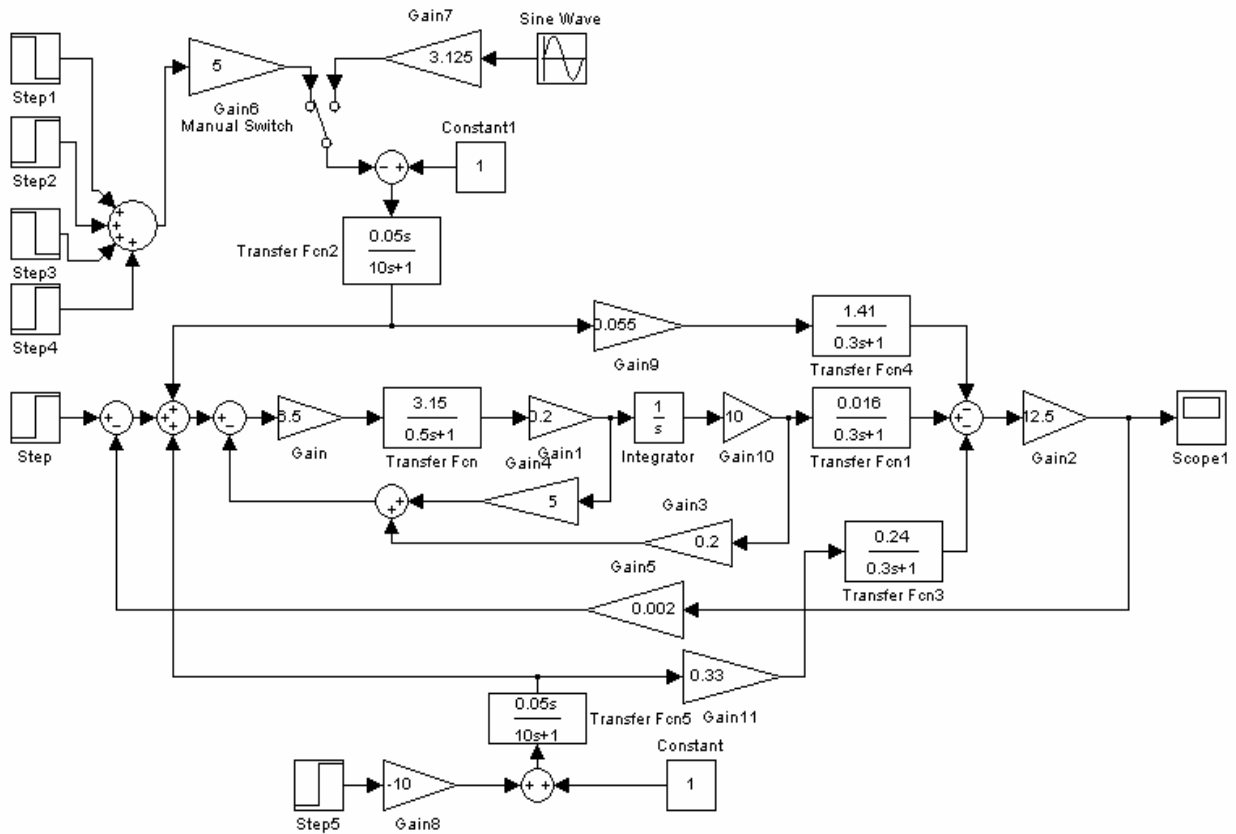


Рис. 12. Схема моделювання системи в середі MATLAB/SIMULINK

Для формування діаграми скачкообразно змінюючого вітрового возмущення використаємо групу блоків Step1 - Step4, таким образом, задавая різні значення швидкості вітра в різні моменти часу. Блок Sine Wave підійде для формування синусоїдально змінюючого вітрового возмущення. Для імітації навантаження використаємо блок Step5.

Реакція системи на скачкообразно і синусоїдально змінюючу швидкість вітра при постійному значенні навантаження приведені відповідно на рис. 13,14. Реакція системи на зміну навантаження при постійній швидкості вітра приведена на рис. 15.

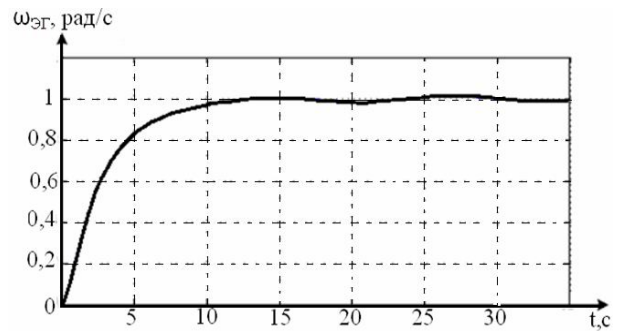


Рис. 14. Реакція системи на синусоїдально змінюючу швидкість вітра

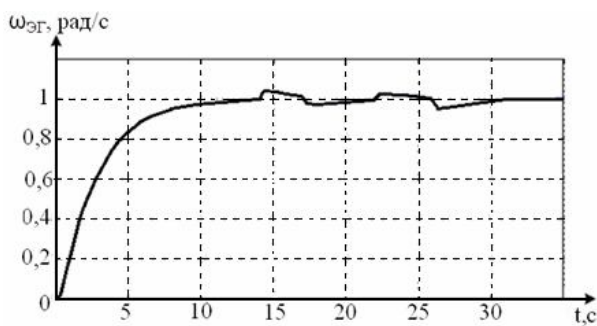


Рис. 13. Реакція системи на скачкообразно змінюючу швидкість вітра

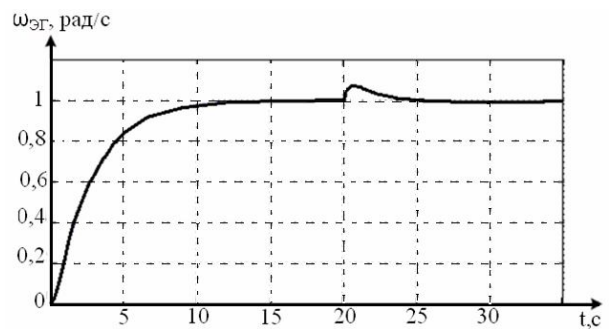


Рис. 15. Реакція системи на зміну навантаження

Для анализа устойчивости была найдена передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_p(s) = \frac{\omega(s)}{U_{3AD}(s)} = \frac{273}{s^3 + 218,1s^2 + 797,7s + 273}. \quad (2)$$

Амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы представлена на рис. 16.

Результаты моделирования показывают, что установившаяся ошибка системы равняется 0 рад/с, время переходного процесса при разных изменениях скорости ветра и нагрузки мало (до 8 с), найдены запасы устойчивости по амплитуде (54,5 dB) и по фазе (143 град). Показатели качества удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системам такого типа.

Заклучение

В данной статье проведен обзор и анализ возможных путей развития установок, использующих альтернативные источники энергии. Более подробно, с точки зрения активного управления, рассмотрена система управления ветроэнергетической установкой Н-типа с поворотными лопастями. Представлен анализ качества функционирования ВЭУ в условиях изменяющегося ветрового потока, нагрузки и углов установки лопастей. Полученная математическая модель объекта управления ВЭУ вертикаль-

но-осевого типа позволяет провести исследования влияния различных типов ветрового воздействия, а также нагрузки на показатели качества замкнутой системы.

Определены значения коэффициентов лопасти ветроустановки Н-типа мощностью 100 кВт. Особенностью функциональной схемы системы управления ветроэнергетической установкой является использование принципа управления путем изменения угла поворота лопастей. Введение внутренних обратных связей в системе по углу отклонения лопасти и ее угловой скорости поворота, а также наличие внешней обратной связи по угловой скорости вращения электрогенератора позволило значительно повысить качество управления.

Результаты машинного моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK при различных видах воздействия ветрового потока и нагрузки подтверждают работоспособность ВЭУ и обеспечение заданных показателей качества.

Дальнейшие исследования предусматривают проведение следующих мероприятий:

- анализ функционирования ВЭУ с учетом линейно нарастающей нагрузки;
- усовершенствование закона управления ВЭУ;
- исследование и дальнейшее проектирование адаптивной системы управления ВЭУ с эталонной моделью.

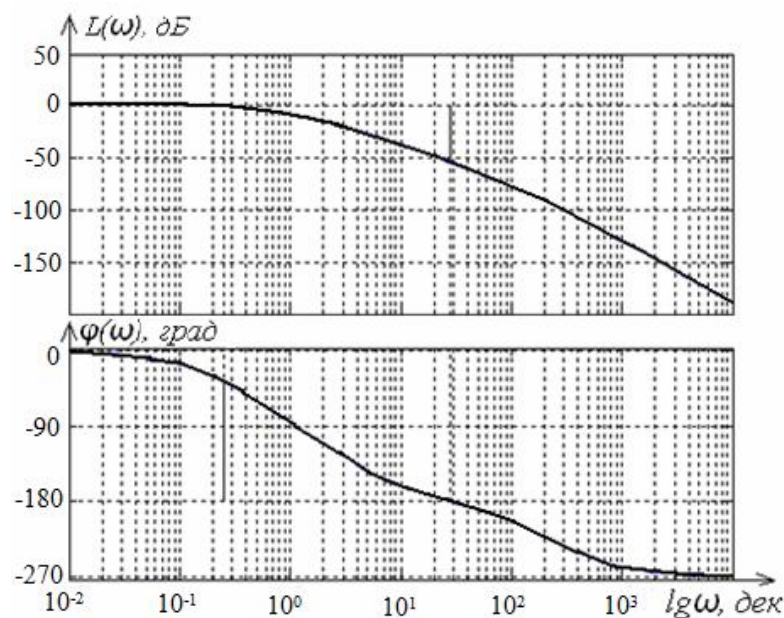


Рис. 16. Амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы

Литература

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика: учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. полит. ун-т, 2006. – 643 с.
2. Пат. 30729 Україна, МПК НО2К 21/22, НО2К 21/12. Автодорожній обмежувач швидкості / Субота А.М., Симонов В.Ф.; Власник НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № u200712319; заявл. 06.11.07; опубл. 11.03.08, Бюл. №5. – 5 с.
3. Пат. 37813 Україна, МПК F24J 2/06. Сонячна електростанція / Субота А.М., Джулгаков В.Г., Вдовкін В.С.; Власник НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № u200808651; заявл. 01.07.08; опубл. 10.12.08, Бюл. №23. – 5 с.
4. Пат. 43323 Україна, МПК F03D 7/06. Вітроенергетична установка / Субота А.М., Вовк Н.В.; Власник НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № u200902821; заявл. 26.03.09; опубл. 10.08.09, Бюл. №15. – 4 с.
5. Пат. 43322 Україна, МПК F03D 7/06. Вітрогідроенергетична установка / Субота А.М., Петрова О.А.; Власник НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № u200902820; заявл. 26.03.09; опубл. 10.08.09, Бюл. №15. – 7 с.
6. Пат. 78143 Україна, МПК F03D 9/02, Н02J 7/35. Пересувна автономна електростанція / Кулік А.С., Субота А.М., Симонов В.Ф., Бандура І.М.; Власник НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № a200507270; заявл. 21.07.05; опубл. 15.02.07, Бюл. №2. – 7 с.
7. Суббота А.М. Система управления ветроэнергетической установкой / А.М. Суббота, И.Ю. Дыбская, А.В. Заболотный // Радиоэлектроника и компьютерные системы. – 2009. – № 3 (37). – С. 61-67.

Поступила в редакцію 16.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедри енергоустановок и двигателей ЛА А.И. Яковлев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ”, Харьков.

МАЙБУТНЄ ЕНЕРГЕТИКИ – АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

А.М. Суббота, Д.О. Гаєвая

Проведений огляд літературних джерел і аналіз можливих шляхів розвитку установок, заснованих на базі використання альтернативних джерел енергії, – сонячної, вітрової, геотермальної, приливної і так далі. З точки зору управління проведений аналіз якості функціонування вітроенергетичної установки (ВЕУ) Н-типу в умовах зміну значень вітрового потоку, навантаження і кутів установки лопатей. Отримана математична модель об'єкту управління ВЕУ вертикально-осьового типу і визначені коефіцієнти передавальної функції об'єкту для вітроустановки Н-типу потужністю 100 кВт. Представлені схема і результати машинного моделювання системи в середовищі MATLAB/SIMULINK, та визначені завдання подальших досліджень.

Ключові слова: «лежачий поліцейський», перетворювач хвилевої енергії в електричну, сонячна батарея, ВЕУ поплавкового типу, вітрогідроустановка, ВЕУ Н-типу, система управління, кут повороту або атаки, ротор, електрогенератор.

THE FUTURE OF ENERGY IS ALTERNATIVE ENERGY SOURCES

A.M. Subbota, D.A. Gayevaya

The review of literary sources and analysis of possible ways of settings development, founded on the base of the use of alternative energy sources – sun, wind, geothermal, flood-tide e.c.. From point of management the analysis of functioning quality of the H-type wind-power plant (WPP) is conducted in the conditions of changing values of wind stream, loading and setting corners of blades. The mathematical model of control object is got and the transmission function coefficients of object are certain for of vertical-axial type WPP of H-type with power 100 kW. A scheme and results of the machine modeling of the system is presented in the environment of MATLAB/SIMULINK, and the tasks of further researches are certain.

Keywords: «lying constabulary», transformer of wave energy in electric, sun battery, WPP of float-type, wind-hydroelectric power, WPP of H-type, control system, corner of turn, rotor, generator.

Суббота Анатолий Максимович – канд. техн. наук, проф., проф. кафедри систем управління летальних апаратів Національного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Гаєвая Диана Александровна – магістрант кафедри систем управління летальних апаратів Національного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.