

УДК 621.548:681.5

А.М. СУББОТА, А.М. РАДЧУК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ**

На базе анализа литературных источников рассмотрены тенденции развития альтернативных источников энергии в различных странах и показаны перспективы их использования. В качестве объекта исследования, как одного из возможных перспективных альтернативных источников энергии, выбрана установка, могущая раздельно или одновременно использовать энергию ветра и воды, т.е. ветрогидроэнергетическая установка (ВГЭУ). В статье приведена функциональная схема системы управления ВГЭУ и её составляющих: ветроэнергетической (ВЭУ) и гидроэнергетической (ГЭУ) установок. Осуществлен анализ качества функционирования ВГЭУ в условиях изменяющихся ветрового потока и пиковых нагрузок, приведены схемы и результаты моделирования системы управления в среде MATLAB/SIMULINK, исследованы влияния характеристик оператора на переходной процесс при включении работы ВЭУ на один с ГЭУ выходной вал при помощи магнитопорошковой муфты.

Ключевые слова: ветрогидроэнергетическая установка, ветроэнергетическая установка, гидроэнергетическая установка, лопасть, угол атаки, управление путем поворота лопасти, ротор, электрогенератор, оператор, магнитопорошковая муфта.

Введение

На сегодняшний день стало ясно, что основные энергоресурсы – нефть, уголь и природный газ – исчерпаемы, и время их эффективной добычи и использования невелико. При существующей тенденции увеличения энергопотребления ветроэнергетика может компенсировать солидную часть потребляемой электроэнергии. Уже сейчас бурное развитие ветроэнергетики свидетельствует о том, что эта отрасль в ближайшем будущем станет одним из важных источников удовлетворения энергетических потребностей человечества. К концу 2003 года мировой ветропарк (40 стран) насчитывал 68000 ветротурбин суммарной мощностью 40301 МВт, выработано 82 ТВт·ч электроэнергии. К 2030 году отдельные страны планируют довести долю ветровой энергии в национальных энергобалансах до существенного уровня: Дания – до 50%, Германия – до 30%, США – до 25%, Китай – до 15%, Испания – до 20% [1].

Национальные программы многих стран предусматривают крупные ветроэнергетические проекты. Например, в США в 2010 – 2030 гг. будут введены в строй ветроэлектростанции (ВЭС): в штате Техас – на 500 МВт, в штате Калифорния – на 439 МВт, в штатах Орегон и Вашингтон – на 300 МВт, в штате Невада – на 260 МВт. В Японии на острове Хоккайдо строится ВЭС на 30 МВт, в Дании – на 9000 МВт. В Германии установлено ВЭУ общей мощностью 2647 МВт. В Испании эксплуатируются ветроустановки общей мощностью 6920 МВт. Важно отметить, что в последние годы себестоимость 1 кВт·ч

электроэнергии, вырабатываемой на оффшорных ВЭС, составляет 0,049 – 0,064 евро.

Экономическое развитие Украины, которая вынуждена закупать за рубежом свыше половины энергоносителей (нефть, газ и т.д.), невозможно без укрепления энергетической базы. В условиях дефицита органических энергоресурсов нетрадиционные способы получения электроэнергии, в первую очередь – ветроэнергетика, приобретают особое значение, отвечая самым высоким требованиям экологии и энергоснабжения [3]. На начало 2002 года суммарная мировая установленная мощность электростанций на возобновляемых источниках энергии составила около 30000 МВт, а первое место среди них занимают ветроэлектрические установки (ВЭУ) и ветроэлектростанции (ВЭС) – около 20000 МВт.

По планам развития ВЭУ в Украине до 2012 года общая мощность ВЭС должна достичь 3500 МВт, а до 2030 года – 16000 МВт. При этом ежегодное производство электроэнергии на базе ВЭУ планируется вывести на уровень 20-35% от общего количества вырабатываемой в стране электроэнергии.

Перспективными для внедрения ветроэнергетики в Украине являются районы, где среднегодовые скорости ветра превышают 5 м/с. Это Азово-Черноморская зона, равнинный и горный Крым, Карпаты, Донецкая и Луганская области.

1. Постановка задачи исследования

В качестве объекта исследования выбрана ветрогидроэнергетическая установка (ВГЭУ). Пробле-

ма управління ВГЭУ весьма актуальна в наше время. Нагрузка на электрогенератор постоянно меняется в зависимости от времени суток и от времени года. Таким образом, задачей системы управления ВГЭУ является обеспечение потребителей качественной электроэнергией. Это достигается стабилизацией выходного напряжения ВГЭУ с помощью поддержания постоянства угловой скорости на валу электрогенератора. Существует масса подходов для решения этой проблемы. Все они имеют свои преимущества и недостатки.

Современные ВГЭУ – это агрегаты, которые преобразуют энергию ветра в механическую энергию вращения ветроколеса, а энергию воды в механическую энергию вращения гидротурбины и затем в электрическую энергию. В настоящее время применяются две основные конструкции ветроагрегатов: горизонтально-осевые и вертикально-осевые ветродвигатели. Оба типа ВЭУ имеют примерно равный КПД [2].

Существует множество вариантов практической реализации системы управления ВЭУ.

В современных ВЭУ воплощено множество технических идей, отвечающих последним достижениям науки. Вот далеко не полный перечень уникальных систем и механизмов, обеспечивающих эффективную и безопасную работу ветроэлектростанций:

- система динамического изменения угла атаки (изменяет угол заклинивания лопастей, удерживая тем самым нужный угол атаки);

- система динамического регулирования скорости вращения ветроколеса в зависимости от нагрузки и скорости ветра (выбирает оптимальный режим работы);

- система управления рысканием – электронный флюгер (поворачивает гондолу с ВЭУ по особому закону с учетом доминирующего направления ветра, его порывов и турбуленции);

- система оперативного регулирования магнитного скольжения асинхронного генератора.

В общем, к основным особенностям ветрогенераторов можно отнести следующее:

- аэродинамические характеристики ротора ветровой установки – нелинейны;

- диапазон изменения частоты вращения привода – ограничен, скоростной режим в зоне минимальных значений, частотная полоса пропускания сигнала – незначительна.

2. Анализ динамики ВГЭУ

При работе ВЭУ и ГЭУ в составе ВГЭУ на один генератор возникает проблема, особенно в пиковые нагрузки. Эта проблема связана с опреде-

ленными требованиями к оператору, который должен своевременно включить либо выключить ту или иную энергоустановку (ЭУ). Например: несвоевременное подключение (отключение) ВЭУ от общего вала с ГЭУ, ВЭУ может превратиться из источника энергии в потребителя, что недопустимо. В связи с этим возникает проблема разработки системы как объединения двух валов, так и разработки системы автоматического управления (САУ) включением либо выключением ЭУ, обладающей качественными характеристиками намного превышающих характеристики оператора. Это необходимо для повышения надежности и недопущения перехода одной из ЭУ из качества источника энергии в потребителя.

Исследуемая схема ВГЭУ объединяет в своем составе: ВЭУ – Н-типа с поворотными лопастями и ГЭУ – классического типа. Для объединения их выходных валов, используется магнитопорошковая муфта (МПМ). Ниже проводятся исследования качественных характеристик отдельно взятых как ВЭУ и ГЭУ, а также исследования при их совместной работе на общую нагрузку. Особое внимание уделено переходному процессу при подключении ВЭУ к ГЭУ при помощи МПМ в пиковые моменты нагрузки. При этом основное потребление электроэнергии обеспечивается – ГЭУ (до 80%), а в пиковые нагрузки, когда добавляется более 20% – обеспечивается ВЭУ.

На рис. 1 изображена общая конструктивная схема ветрогидроэнергетической установки, на рис. 2 – магнитопорошковая муфта обеспечивающая объединение двух выходных валов ЭУ [5].

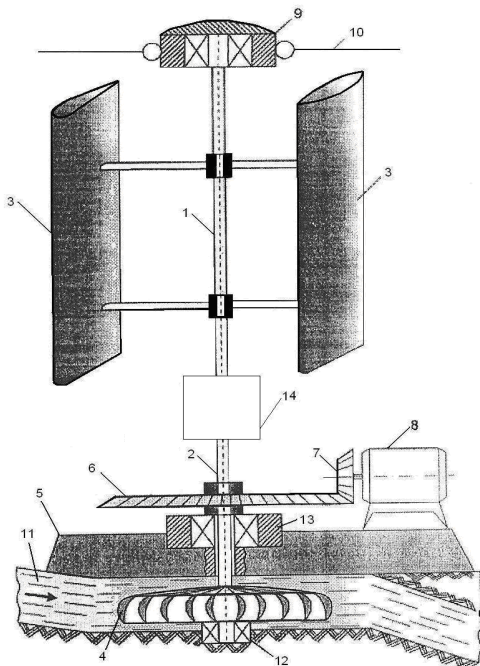


Рис. 1. Общая конструктивная схема ветрогидроэнергетической установки

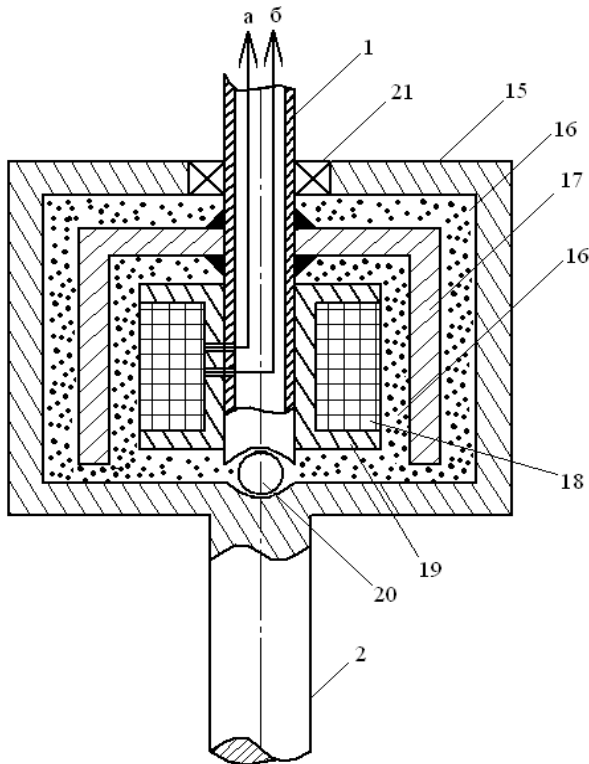


Рис. 2. Магнітопорошкова муфта

На рис. 1 обозначено: вертикальный вал ветроэнергетической установки 1, вертикальный вал гидротурбины 2, рабочие лопасти ротора 3, гидротурбина 4, основание 5, шестерня передачи крутящего момента электрогенератора 6, шестерня сцепления 7, электрогенератор 8, верхняя опора вала 9, растяжки 10, водогон 11, нижняя опора 12, дополнительная опора 13, магнитопорошковая муфта 14, в состав которой входят: внешний корпус 15, магнитный порошок 16, внутренний корпус 17, катушка 18, корпус катушки 19, шаровая опора 20, шариковый подшипник 21.

Принцип действия ветро- и гидроэнергетической установок достаточно известный, потому основное внимание уделим вопросам разъединения и объединения валов ветро- и гидроэнергетических установок с помощью магнитопорошковой муфты 14 (см. рис. 1). При отсутствии питания катушки 18, которое подается от источника питания $U_{п}$ (см. рис. 2) через контакты а и б вертикальный вал ветроэнергетической установки 1 и вертикальный вал гидротурбины 2 не имеют жесткого соединения. Это обусловлено тем, что частицы магнитного порошка 16, не будучи намагничены, не имеют между собой связи. Таким образом, вертикальный вал гидротурбины 2 свободно вращается вокруг вертикального вала ветроэнергетической установки 1, что обеспечивается наличием шарикового подшипника 21 и шаровой опоры 20. При подаче питания в катушку 18 частицы магнитного порошка 16 за счет

магнитного поля катушки 18 намагничиваются и жестко сцепляются между собой. При этом магнитный порошок 16 превращается в цельную массу, которая жестко соединяет внешний корпус магнитопорошковой муфты 15, который в свою очередь жестко соединен с вертикальным валом гидротурбины 2, с внутренним корпусом магнитопорошковой муфты 17, который в свою очередь, жестко соединен с вертикальным валом ветроэнергетической установки 1.

3. Функциональная схема системы управления ВГЭУ

Задачей данной системы управления является повышение мощности ветрогидроэнергетической установки в пиковые нагрузки и обеспечение ее непрерывной работы.

Поскольку ВГЭУ по своей сути объединяет две системы: ветроэнергетическую и гидроэнергетическую, то при уменьшении скорости ветра ниже расчетной производство электроэнергии может продолжаться за счет работы ГЭУ, а при некотором снижении уровня воды производство электроэнергии может быть поддержано ВЭУ. Таким образом, две системы работают на достижение одной цели – обеспечение непрерывного производства электроэнергии за счет одновременной работы в условиях изменения как массы потока воды, так и скорости потока ветра.

Таким образом, предложенная ВГЭУ обеспечивает непрерывное производство электроэнергии и не требует дополнительных агрегатов для запуска ветроэнергетической установки. Кроме того, она наиболее полно отвечает наличию возобновляемых источников энергии, особенно западных районов Украины.

Функциональная схема ВГЭУ имеет вид, представленный на рис. 3.

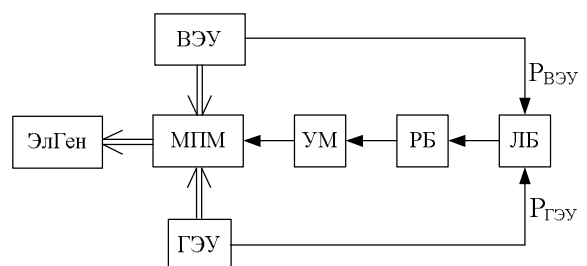


Рис. 3. Функциональная схема ВГЭУ

На рис. 3 обозначено: МПМ – магнитопорошковая муфта; УМ – усилитель мощности; РБ – решающий блок; ЛБ – логический блок; ГТ – гидротурбина; $P_{\text{ВЭУ}}$ – дополнительная мощность, выраба-

тываемая ВЭУ; $P_{\text{АГО}}$ – мощность, вырабатываемая ГЭУ, ЭлГен – электрогенератор.

Логика подключения ВЭУ в совместной работе с ГЭУ может быть описана следующим выражением:

$$U_{\text{вкл_лб}} = \begin{cases} 0, & P_{\text{ГЭУ}} < P_{\text{ВЭУ}}, \\ 1, & P_{\text{ГЭУ}} \geq P_{\text{ВЭУ}}. \end{cases}$$

Динамика ВЭУ с поворотными лопастями и её анализ приведен в работе [4, 7, 8], поэтому ниже основное внимание будет уделено вопросам динамики, как ГЭУ, так и совместной работы ГЭУ с ВЭУ

4. Функциональная схема системы управления ГЭУ

Для эффективного производства электроэнергии при помощи ГЭУ необходим основной фактор: гарантированная обеспеченность водой круглый год. Этому может способствовать относительно большие уклоны реки и каньйообразные виды рельефа.

Существует много способов стабилизации угловой скорости вращения гидротурбины ГЭУ. Все они имеют свои преимущества и недостатки. Наиболее эффективным с точки зрения качества управления является управление путем поворота угла атаки лопасти гидротурбины.

Задача управления заключается в обеспечении максимального быстродействия реагирования системы на изменения потока воды и нагрузки потребления с целью стабилизации выходного напряжения электрогенератора.

Для достижения этого в систему вводятся обратные связи, которые подают на вход информацию об угле поворота лопасти, угловой скорости вращения ГЭУ, величине мощности электрогенератора, а также угловой скорости ротора электрогенератора.

Регулятор системы управляет сервоприводом лопасти, который отклоняет ее на требуемый угол. Ротор ГЭУ через редуктор связан с электрогенератором [5].

На рис. 4 приведена функциональная схема ГЭУ. Полученная схема будет рассмотрена при совместной работе с ВЭУ в составе ВГЭУ.

5. Моделирование системы управления ВГЭУ в среде MATLAB/SIMULINK

Схема моделирования СУ ВГЭУ с использованием магнитопорошковой муфты приведена на рис. 5. Результаты исследования во временной области для синусоидального изменения ветра и для скачкообразного изменения ветра приведены соответственно на рис. 6 и рис. 7.

Для формирования диаграммы скачкообразно изменяющегося ветрового возмущения использована группа блоков Step1 – Step5 с учетом соответствующего задания различных значений скорости ветра в различные моменты времени. Блок Sine Wave использовался для формирования синусоидально изменяющегося ветрового возмущения. Для имитации нагрузки использовался блок Step6. Для переключения скачкообразного и синусоидального возмущения служит блок – Manual Switch. Остальные блоки являются стандартными и достаточно хорошо известными.

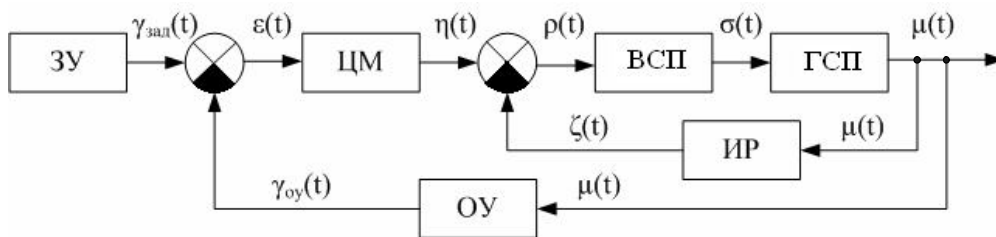


Рис. 4. Функциональная схема ГЭУ:

ЗУ – задающее устройство; ЦМ – центробежный маятник; ВСП – вспомогательный сервопривод; ГСП – главный сервопривод; ИР – издромный регулятор; ОУ – объект управления (турбина); $\gamma_{\text{зад}}(t)$ – задающий сигнал; $\epsilon(t)$ – разностный сигнал ошибки; $\eta(t)$ – выходной сигнал центробежного маятника; $\rho(t)$ – сигнал ошибки; $\sigma(t)$ – выходной сигнал вспомогательного сервопривода; $\mu(t)$ – выходной сигнал главного сервопривода; $\zeta(t)$ – выходной сигнал издромного регулятора; $\gamma_{\text{оу}}(t)$ – выходной сигнал объекта управления

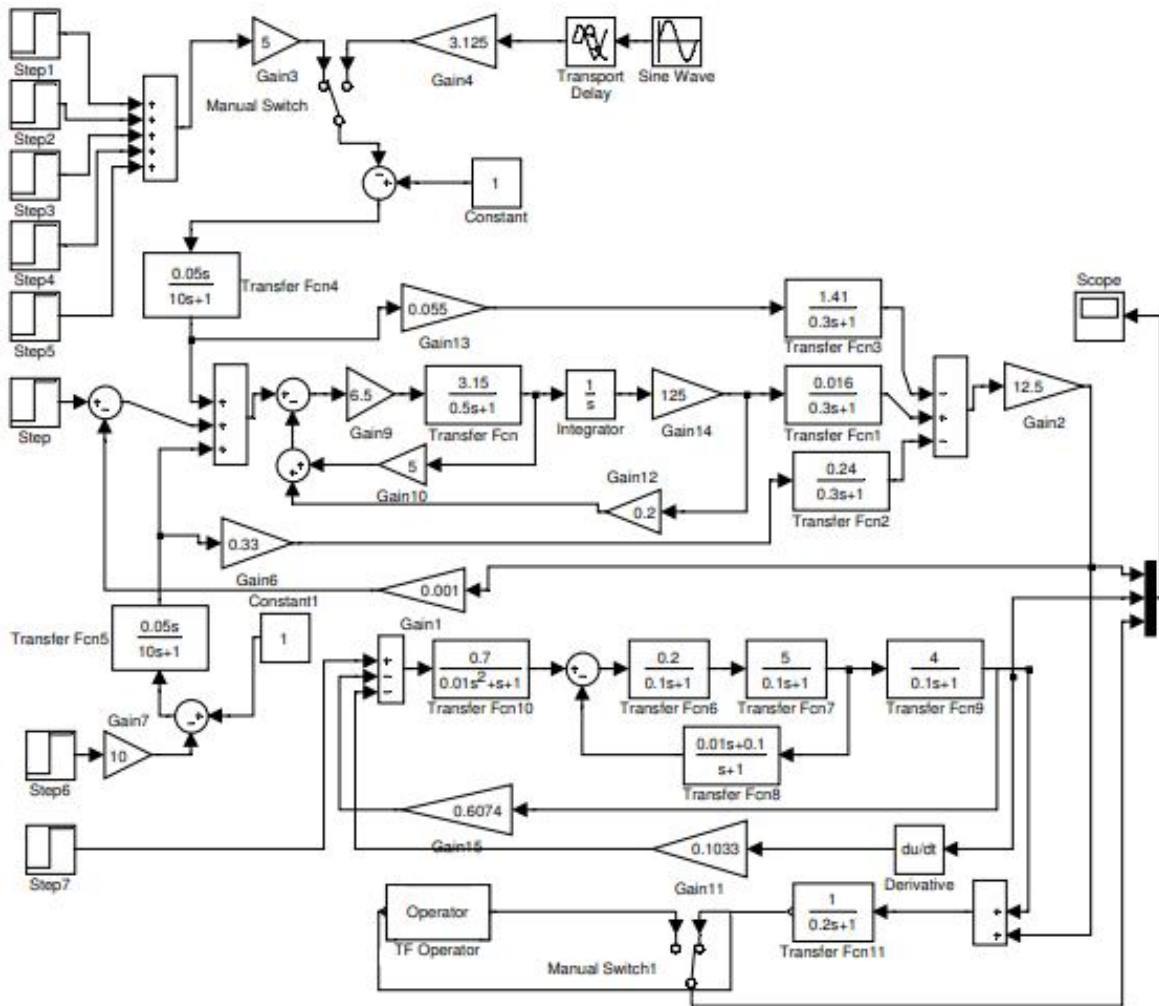


Рис. 5. Моделирование системы управления ВГЭУ с магнитопорошковой муфтой в среде Matlab/Simulink

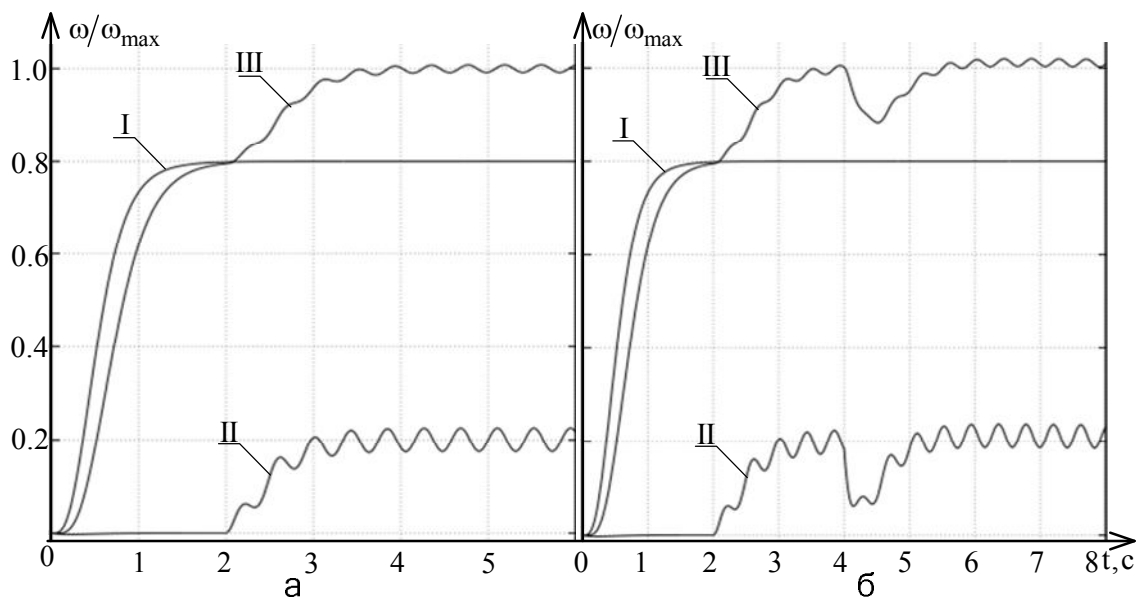


Рис. 6. Результаты моделирования СУ ВГЭУ с магнитопорошковой муфтой для синусоидального изменения ветра во временной области в среде Matlab/Simulink: I – сигнал с ГЭУ, II – сигнал с ВЭУ, III – сигнал с ВГЭУ; а – без нагрузки, б – с нагрузкой

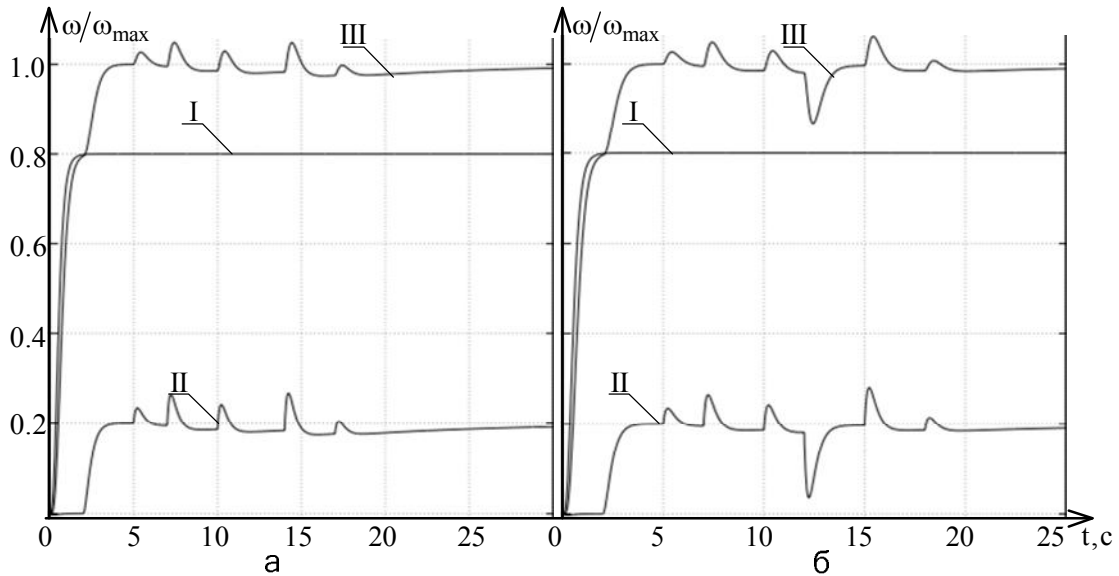


Рис. 7. Результаты моделирования СУ ВГЭУ с магнитопорошковой муфтой для скачкообразного изменения ветра во временной области в среде Matlab/Simulink:
 I – сигнал с ГЭУ, II – сигнал с ВЭУ, III – сигнал с ВГЭУ; а – без нагрузки, б – с нагрузкой

На рис. 8 предоставлена модель человека-оператора, которая в дальнейшем заменяет блок – Орегатор, изображенный на рис. 5. На рис. 9, 10 приведены результаты моделирования с учетом модели человека-оператора при различных видах ветровых нагрузок.

Далее на рис. 11 –13 приведены соответственно схема и результаты моделирования модели человека-оператора с несколько иной моделью динамических характеристик модели человека-оператора.

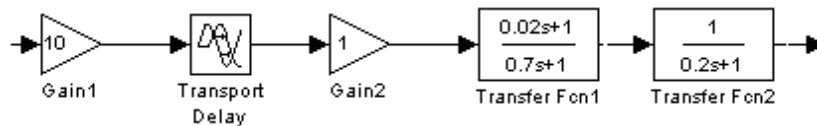


Рис. 8. Моделирование СУ ВГЭУ с оператором в среде Matlab/Simulink

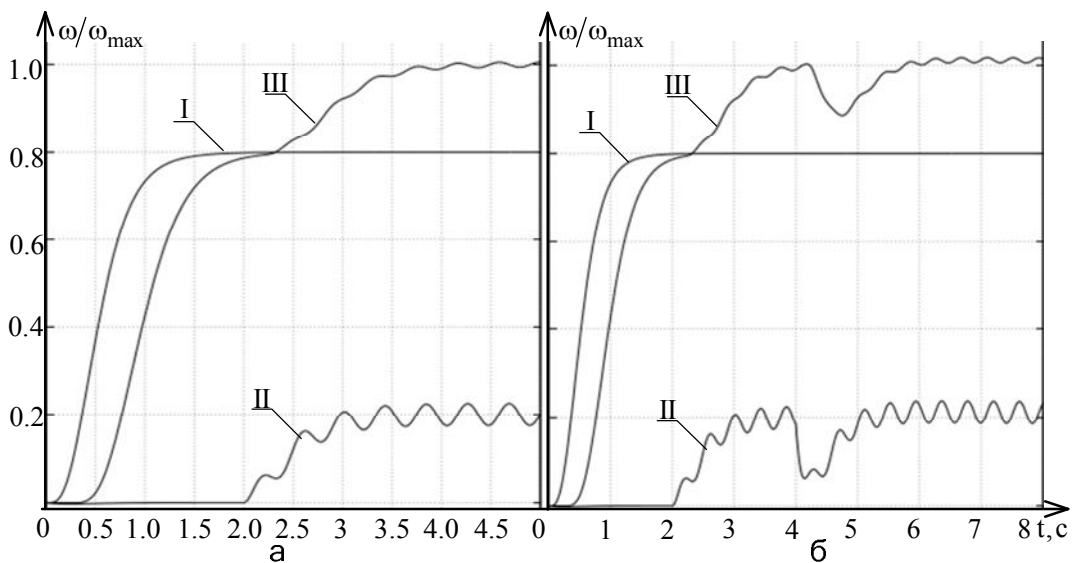


Рис. 9. Результаты моделирования СУ ВГЭУ с оператором для синусоидального изменения ветра во временной области в среде Matlab/Simulink:
 I – сигнал с ГЭУ, II – сигнал с ВЭУ, III – сигнал с ВГЭУ; а – без нагрузки, б – с нагрузкой

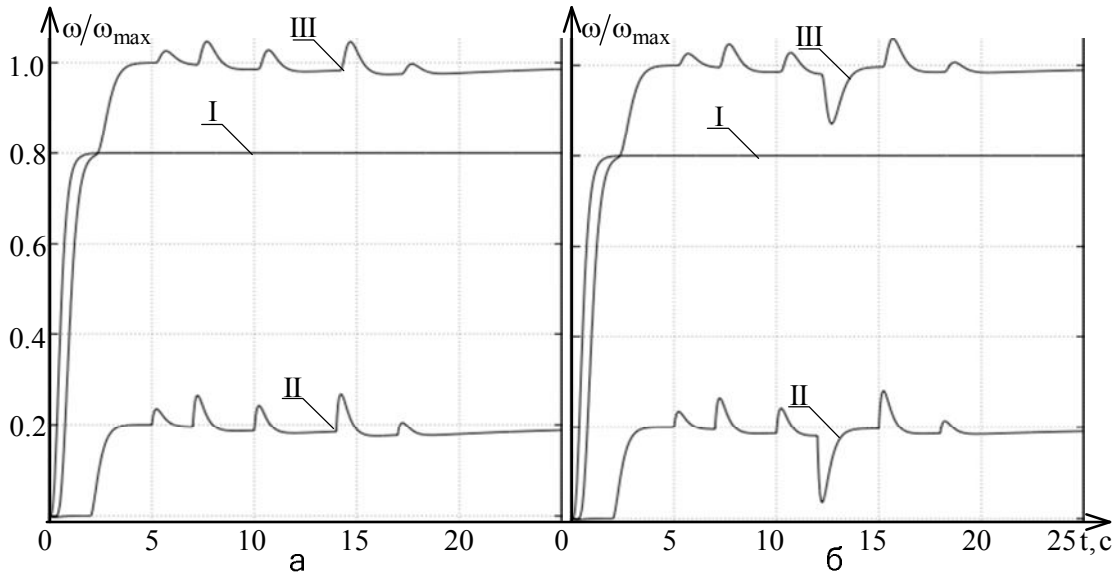


Рис. 10. Результаты моделирования СУ ВГЭУ с оператором для скачкообразного изменения ветра во временной области в среде Matlab/Simulink: I – сигнал с ГЭУ, II – сигнал с ВЭУ, III – сигнал с ВГЭУ; а – без нагрузки, б – с нагрузкой

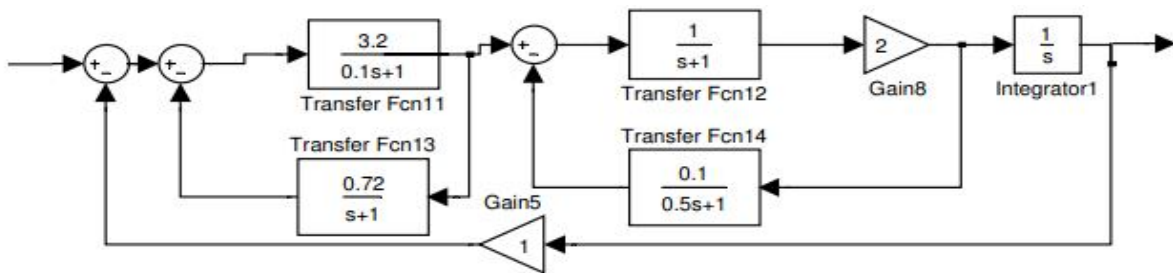


Рис. 11. Моделирование СУ ВГЭУ с оператором в среде Matlab/Simulink

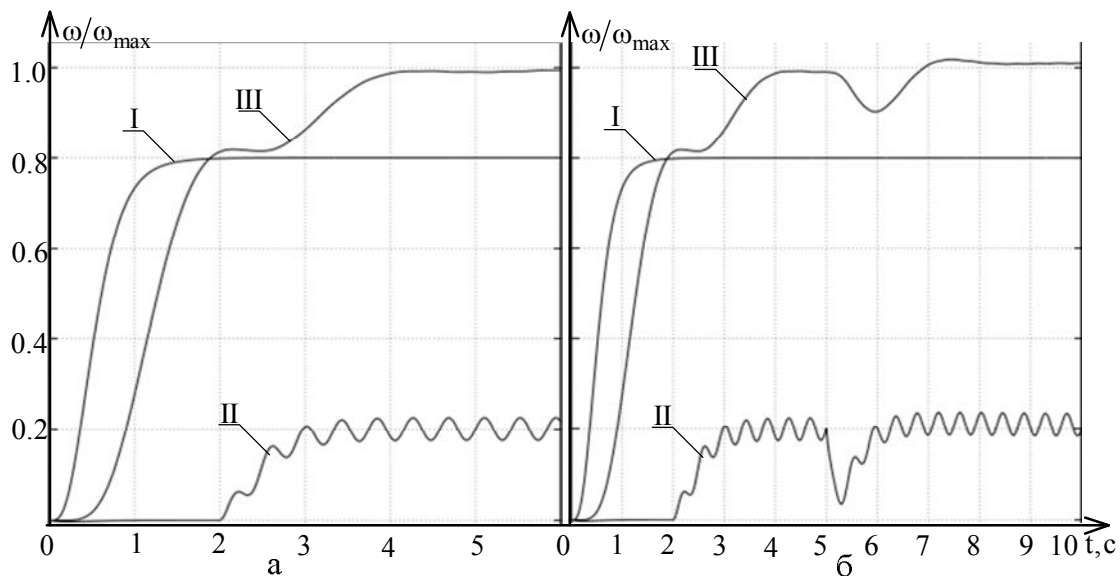


Рис. 12. Результаты моделирования СУ ВГЭУ с оператором для синусоидального изменения ветра во временной области в среде Matlab/Simulink: I – сигнал с ГЭУ, II – сигнал с ВЭУ, III – сигнал с ВГЭУ; а – без нагрузки, б – с нагрузкой

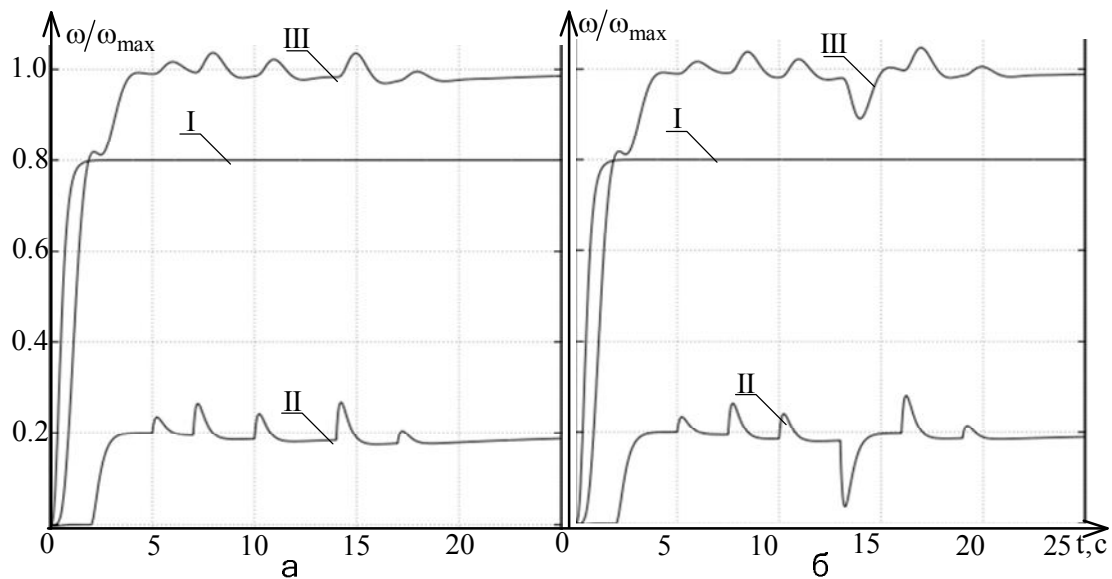


Рис. 13. Результаты моделирования СУ ВГЭУ с оператором для скачкообразного изменения ветра во временной области в среде Matlab/Simulink: I – сигнал с ГЭУ, II – сигнал с ВЭУ, III – сигнал с ВГЭУ; а – без нагрузки, б – с нагрузкой

Результаты моделирования показывают, что установившаяся ошибка системы равняется 0, время переходного процесса при разных изменениях скорости ветра и нагрузки мало (до 8 с). Показатели качества удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системам такого типа. Значительных отличий модели человека-оператора не получено. Это говорит, что на практике можно использовать как одну, так и другую модель человека-оператора.

Заключение

Полученные результаты машинного моделирования системы управления в среде MATLAB/SIMULINK при различных видах воздействия ветрового потока и нагрузки подтверждают работоспособность ВГЭУ и обеспечение требуемых показателей качества.

Для того чтобы обеспечить требования к динамике процесса подключения ВЭУ к ГЭУ в единую энергетическую систему, проведены исследования влияния динамических характеристик оператора, как одного из элементов САУ, на качество управления системы автоматики. При этом получено следующее: максимальная задержка оператора может составлять $\tau = 0,5$ с, коэффициент усиления оператора при мгновенном возникновении пиковых нагрузок может меняться от 5 до 100, что желательно в этом случае его функции возложить на АСУ. Кроме того как показали эксперименты при подключении ВЭУ, время переходного процесса оператора может достигать 10 с и более, что нежелательно для таких систем.

Полученные результаты исследований качества переходной характеристики полученной в момент объединения ВЭУ с ГЭУ в единую энергетическую систему показывает, что благодаря МПМ их объединение при условии скачкообразного увеличения нагрузки осуществляется достаточно плавно и безударно. При этом процесс объединения осуществляется за сравнительно малый промежуток времени, что свидетельствует о хорошем быстродействии системы автоматики по сравнению с быстродействием оператора.

В дальнейшем предусматривается проведение дополнительных исследований с учетом адаптации системы управления к изменению ускорений вращения ветро- и гидротурбин с целью защиты от недопустимых нагрузок, что необходимо для повышения надежности их конструктивных элементов.

Литература

1. Кривцов, В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэнергогенераторы [Текст] : учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. политех. ун-т, 2003. – 400 с.
2. Фатеев, Е.М. Ветродвижатели и ветроустановки [Текст] : учеб. пособие / Е.М. Фатеев. – М.: ГосИздат. с.-х. лит., 1957. – 536 с.
3. Кривцов, В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика [Текст] : учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. политех. ун-т, 2006. – 643 с.
4. Пат. 43323 Україна, МПК F 03 D 7/06. Вітроенергетична установка [Текст] / Суббо-

та А.М., Вовк Н.В.; заявник та патентовласник НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № u200902821; заявл. 26.03.09; опубл. 10.08.09, Бюл. №15. – 4 с.

5. Пат. 61684 Україна, МПК F 03 D 7/06. Вітрогідроенергетична установка [Текст] / Суббота А.М., Коваленко Т.І., Радчук А.М.; заявник та патентовласник НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № u2011001570; заявл. 04.01.11; опубл. 25.07.11, Бюл. №14. – 8 с.

6. Пат. 43322 Україна, МПК F 03 D 7/06. Вітрогідроенергетична установка [Текст] / Суббота А.М., Петрова О.А.; заявник та патентовласник НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». –

№ u200902820; заявл. 26.03.09; опубл. 10.08.09, Бюл. №15. – 7 с.

7. Суббота, А.М. Система управления ветро-энергетической установкой [Текст] / А.М. Суббота, И.Ю. Дыбская, А.В. Заболотный // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 3 (37). – С. 61-67.

8. Суббота, А.М. Будущее энергетики – альтернативные источники энергии [Текст] / А.М. Суббота, Д.А. Гаевая // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 4 (45). – С. 125-132.

Поступила в редакцию 3.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов А.И. Яковлев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „Харьковский авиационный институт“, Харьков.

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВІТРОГІДРОЕНЕРГІТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ

А.М. Суббота, А.М. Радчук

На базі аналізу літературних джерел розглянуто тенденції розвитку альтернативних джерел енергії в різних країнах і показані перспективи їх використання. Як об'єкт дослідження, як одного з можливих перспективних альтернативних джерел енергії, обрана установка, яка може роздільно або одночасно використовувати енергію вітру і води, тобто вітрогідроенергетична установка (ВГЕУ). У статті наведена функціональна схема системи управління ВГЕУ та її складових: вітроенергетичної (ВЕУ) і гідроенергетичної (ГЕУ) установок. Здійснено аналіз якості функціонування ВГЕУ в умовах змінюються вітрового потоку і пікових навантажень, наведені схеми і результати моделювання системи управління в середовищі MATLAB/SIMULINK, досліджені впливу характеристик оператора на перехідний процес при включенні роботи ВЕУ на один з ГЕУ вихідний вал за допомогою магнітопорошкової муфти.

Ключові слова: вітрогідроенергетична установка, вітроенергетична установка, гідроенергетична установка, лопата, кут атаки, ротор, альтернативна енергія, електрогенератор, оператор, магнітопорошкова муфта.

CONTROL SYSTEM OF WIND HYDROPOWER STATION

A.M. Subbota, A.M. Radchuk

Based on the analysis of literary sources examined trends in alternative energy sources in various countries and the prospects for their use. As the object of study as a possible future alternative energy sources, selected to install, which may separately or simultaneously using wind energy and water, i.e., wind hydropower station (WHPS). The article presents the functional diagram of the control system WHPS and its components: wind power station (WPS) and hydropower station (HPS) units. The analysis of the quality of functioning in a changing WHPS wind flow and peak loads, given the scheme and the simulation results in the control system environment MATLAB/SIMULINK, investigated the influence of characteristics of the operator on the transition process for the inclusion of WPS on a with HPS an output shaft by means of magnetic particle clutch.

Key words: wind hydropower station, wind power station, hydropower station, the blade, angle of attack, rotor, alternative energy, electric generator, operator, magnetic particle clutch.

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

Радчук Андрей Михайлович – магистрант кафедри систем управління летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.