

УДК 62-83:621.311.245

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК: СТРУКТУРА И АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ****А. Н. Буров**

Запорожская государственная инженерная академия

просп. Ленина, 226, г. Запорожье, 69006, Украина. E-mail: aleksey\_200581@mail.ru

Предложена и описана структура экспериментального стенда для имитации поведения ветротурбин малой мощности на основе серийно выпускаемой элементной базы, позволяющего проводить исследование, разработку и диагностику соответствующих систем электрооборудования ветроэнергетических установок. Разработана общая концепция построения экспериментального стенда, а также структура и аппаратная реализация его основных узлов. Представлена гибкая структура системы управления экспериментального стенда с возможностью реализации различных режимов его работы в зависимости от степени участия оператора и способа задания значений скорости ветрового потока. Разработан соответствующий обобщенный алгоритм функционирования управляющего микроконтроллера.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, ветротурбина, имитатор, экспериментальный стенд, электропривод постоянного тока.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК: СТРУКТУРА І АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ****О. М. Буров**

Запорізька державна інженерна академія

просп. Леніна, 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна. E-mail: aleksey\_200581@mail.ru

Запропонована й описана структура експериментального стенду для імітації поведінки вітротурбін малої потужності на основі серійної елементної бази, що випускається, яка дозволяє проводити дослідження, розробку та діагностику відповідних систем електрообладнання вітроенергетичних установок. Розроблена загальна концепція побудови експериментального стенду, а також структура й апаратна реалізація його основних вузлів. Приведено гнучку структуру системи управління експериментального стенду з можливістю реалізації різних режимів його роботи залежно від ступеня участі оператора і способу завдання значень швидкості вітрового потоку. Розроблений відповідний узагальнений алгоритм функціонування керуючого мікроконтролера.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка, вітротурбіна, імітатор, експериментальний стенд, електропривод постійного струму.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В последние десятилетия наблюдается тенденция использования автоматизированных электроприводов в качестве систем, имитирующих поведение реальных ветротурбин (ВТ) [1–9]. Основная задача таких систем – воспроизведение на валу генератора ветроэнергетической установки (ВЭУ) механического момента, подобного механическому моменту ВТ, работающей в реальных ветровых условиях. Применение систем имитации (далее имитаторов ветротурбин или ИВТ) позволяет существенно снижать сроки и стоимость работ, связанных с исследованием, разработкой и диагностикой электрооборудования (ЭО) ВЭУ за счёт их проведения в лабораторных условиях без подключения к реальным ВТ.

Вопросам разработки систем имитации поведения ВТ посвящен ряд работ и зарубежных [1–4], и отечественных ученых [5–9]. Так, в работе [5] автором проведен анализ существующих систем имитации и предложен ряд классификационных признаков для данных систем в зависимости от задействованных аппаратных и программных средств. Это позволило систематизировать и обобщить опыт в области проектирования подобных систем. В [6] проведен стоимостной анализ систем электроприводов и показана целесообразность применения в ИВТ привода постоянного тока с ростом установленной мощности имитируемой ветротурбины. В статьях [7, 8] описана новая структура системы имитации на базе привода постоянного тока и соот-

ветствующая методика расчёта с учётом особенностей этапа моделирования. Настоящая статья является логическим продолжением указанных работ и посвящена разработке экспериментального образца ИВТ для исследования ЭО ВЭУ малой мощности на основе серийно выпускаемой элементной базы.

Основная цель данной работы – описание общей концепции построения, а также структуры и аппаратной реализации основных узлов экспериментального стенда ИВТ.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**  
*Общие вопросы.* В качестве базовой для разработки экспериментального стенда была выбрана наиболее распространённая структура ИВТ на базе привода постоянного тока (рис. 1), представленная в [1, 2] и построенная по принципу регулирования механического момента на валу двигателя.

В данной системе управление двигателем ( $D$ ) осуществляется с помощью нереверсивного управляемого выпрямителя ( $VB$ ), подключенного через сглаживающий реактор ( $Ld$ ). Электромагнитный момент ( $Ma$ ) двигателя определяется путем анализа тока якоря ( $Ia$ ), полученного с помощью датчика тока ( $DT$ ), и его последующего пересчёта с помощью блока  $Ma$  ( $Ia$ ). Момент задания ( $Mзад$ ) определяется блоком формирования параметров имитации ( $БФПИ$ ) на основе текущих значений входных параметров: скорости ветра ( $Vb(t)$ ), угла установки лопастей ( $\beta$ ) и угловой скорости ( $\omega d$ ). Угловая скорость определяется с помощью датчика скорости

(ДС), розположеного на валу ЕД и являється, по сути, еквівалентом кугової шкорооти системи „ВТ-

генератор ВЭУ”.

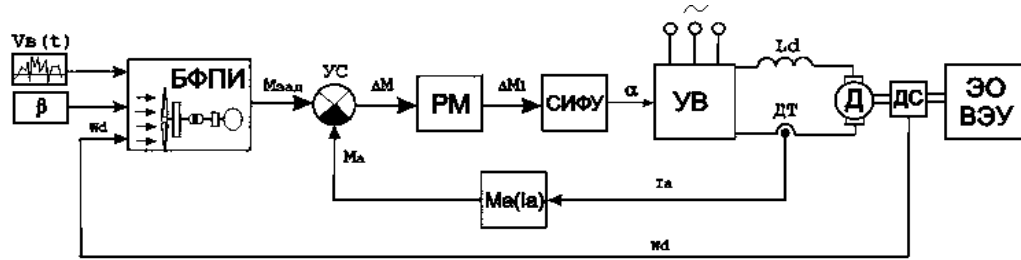


Рисунок 1 – Структура ИВТ

Регулятор момента (PM) и система импульсно-фазового управления (СИФУ) обеспечивают формирование заданного момента электродвигателя имитатора путём воздействия на выпрямитель. Следует отметить, что подключение обмотки возбуждения двигателя к одной фазе сетевого напряжения осуществляется через однофазный мостовой неуправляемый выпрямитель и на рисунке не указано.

При изменении значения одного из входных параметров БФПИ, в соответствии с математической моделью ветротурбины, изменится значение заданного момента, который, соответственно, будет обрабатываться электроприводом имитатора. Таким образом, достигается подобие поведения ветротурбины и автоматизированного электропривода имитатора.

На первом этапе в качестве объекта имитации выбрана ветротурбина с жёсткой аэродинамикой лопастей, математическая модель которой реализована на основе аналитического выражения, описывающего семейство механических статических характеристик (рис. 2) данной ВТ [10]:

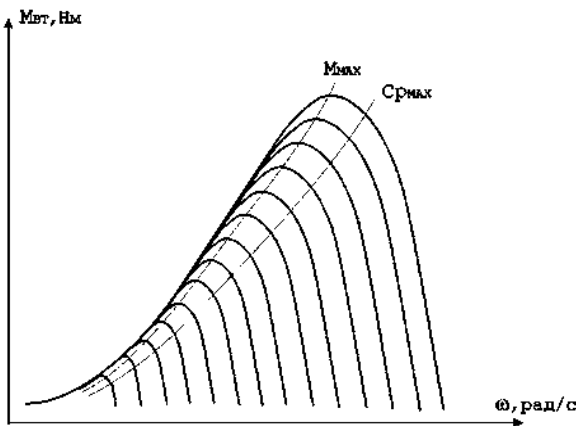


Рисунок 2 – Семейство механических характеристик ВТ при неизменной аэродинамике лопастей

$$M_{ВТ}(\omega_{ВТ}, V_B) = \frac{1}{2 \cdot \omega_{ВТ}} \cdot \rho \cdot V_B^3 \cdot S_{ВТ} \cdot C_P(Z), \quad (1)$$

где  $M_{ВТ}(\omega_{ВТ}, V_B)$  – статический механический момент ВТ, [Н·м];  $\omega_{ВТ}$  – угловая скорость вала ветротурбины, [рад/с];  $\rho$  – плотность воздуха, [кг/м<sup>3</sup>];  $V_B$  – скорость набегающего ветрового потока, [м/с];  $S_{ВТ}$  – эффективная площадь ВТ, [м<sup>2</sup>];  $C_P$  – коэффициент

использования ВТ энергии ветрового потока;  $Z = \omega_{ВТ} \cdot R_{ВТ} / V_B$  – коэффициент быстроходности ВТ;  $R_{ВТ}$  – радиус ВТ, [м];  $C_P(Z)$  – рабочая характеристика ВТ, заданная таблично или с помощью аппроксимирующих функций.

*Структура стенда.* Обобщённая структура экспериментального стенда для исследования электрооборудования ВЭУ представлена на рис. 3. В ней можно выделить две части: гонную (или систему имитации) и генерирующую.

Система имитации, как уже отмечалось, построена на базе нереверсивного электропривода постоянного тока. Генерирующая система в данном случае играет роль нагрузки. Для контроля текущего состояния системы в её электрической части и на валу электродвигателя (Д) установлены датчик тока (ДТ) и датчик скорости (ДС) соответственно.

Основные параметры имитируемой ВТ:

- номинальная мощность – 4 кВт;
- номинальная угловая скорость – 300 об/мин;
- номинальный момент – 122 Н·м;
- радиус ВТ – 2,5 м;
- момент инерции ротора – 25,8 кг·м<sup>2</sup>;
- оптимальная быстроходность - 9,1;
- максимальный коэффициент преобразования энергии ВП - 0,4727;
- средняя скорость ветра – 4,425 м/с.

В качестве электрической машины, в соответствии с параметрами объекта имитации и предложенной в работе [9] методикой расчета электромеханической системы имитатора ВТ, выбран двигатель постоянного тока (Д) типа П-42 со следующими основными параметрами:

- номинальная мощность на валу – 7,4 кВт;
- номинальная скорость вращения ротора – 3000 об/мин;
- номинальное напряжение якоря – 220 В;
- момент инерции – 0,045 кг·м<sup>2</sup>;
- коэффициент полезного действия – 84,5 %.

Параметры двигателя были выбраны с некоторым запасом, исходя из необходимости имитировать динамические перегрузки, возникающие на валу генератора ВЭУ при порывах ветрового потока.

Двигатель подключается к питающей сети через силовой блок имитатора, понижающий трансформатор напряжения (ТН) и автоматический выключатель (QFI). Регулирование тока возбуждения осуществляется с помощью реостата (R1).

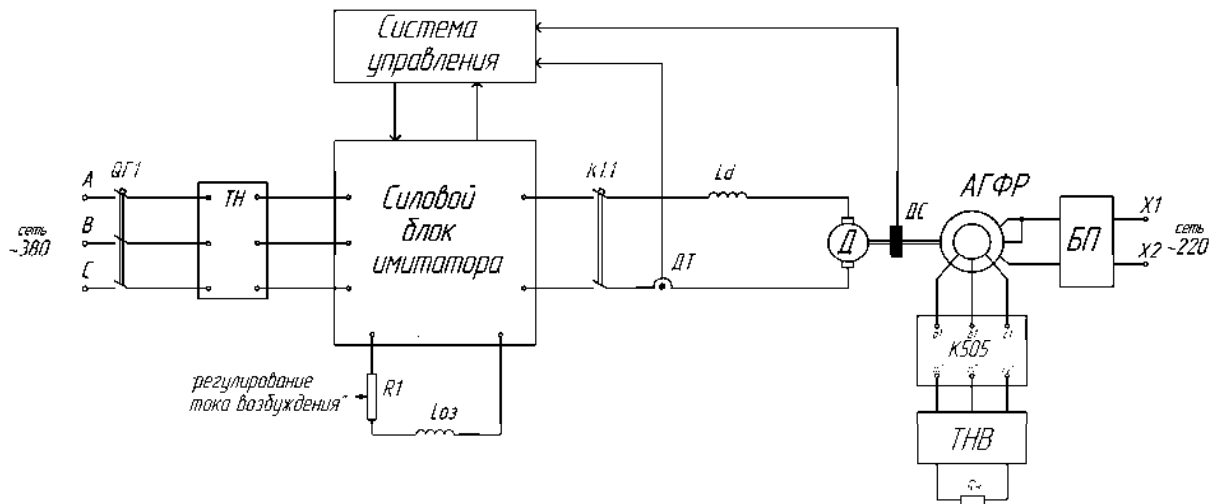


Рисунок 3 – Структура експериментального стенда

Подключение цепи возбуждения двигателя также осуществляется с помощью силового блока стенда и на рисунке не указано. Сглаживающий реактор ( $L_d$ ) позволяет уменьшить пульсации выходного тока, а пускатель (К1.1) – предотвратить несанкционированный пуск двигателя и осуществить его отключение при исчезновении возбуждения.

Генерирующая система имеет упрощенную структуру (рис. 3) и построена на базе асинхронного генератора с фазным ротором (АГФР). Для применения в исследовательском стенде была выбрана электрическая машина типа МТФ–111–6 с такими основными параметрами:

- номинальная угловая скорость – 895 об/мин.;
- синхронная частота вращения – 1000 об/мин.;
- номинальная мощность – 3,5 кВт;
- номинальный момент – 35 Н·м;
- КПД – 70 %;
- коэффициент мощности  $\cos\phi$  – 0,71;
- номинальный ток ротора – 15 А;
- номинальный ток статора – 10,4 А;
- номинальное напряжение статора – 220 В;
- номинальное напряжение ротора – 165 В.

Питание обмотки статора осуществляется постоянным напряжением с помощью блока питания (БП), а активная нагрузка ( $R_n$ ) подключена через трехфазный неуправляемый выпрямитель (ТНВ) к обмоткам ротора.

Для контроля электрических параметров на зажимах ротора использован измерительный комплект К505. При таком подключении механические характеристики АГФР имеют линейный характер, а их наклон определяется величиной напряжения блока питания  $U_{БП}$ . ДПТ и АГФР установлены на массивной металлической платформе и соединены специальной муфтой непосредственно вал к валу (рис. 4).

Таким образом, вращение двигателя имитатора передается непосредственно (без редуктора) на вал генератора. Все узлы стенда, кроме платформы с электрическими машинами, размещены на металлическом каркасе (рис. 5).



Рисунок 4 – Соединение электрических машин экспериментального стенда

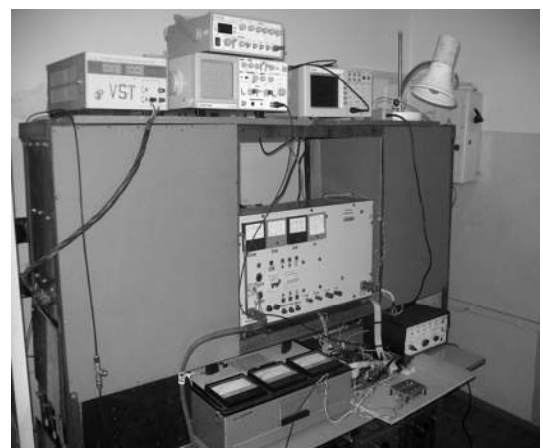


Рисунок 5 – Размещение аппаратуры экспериментального стенда

*Силовой блок.* Силовой блок (рис. 6) выполняет функции контроля и индикации электрических параметров привода, а также защитные функции.



ляется условными переключателями *S1*, *S2* и *S3* (рис. 9). Возможны три режима работы:

– ручной режим (переключатели *S1* и *S2* переведены в положение 1) – имитатор работает как электропривод с подчиненным управлением скорости, с возможностью задания тока (момента) и угловой скорости двигателя оператором;

– полуавтоматический режим (переключатели *S1*, *S2* и *S3* переведены в положение 2) – оператор задает только значения скорости ветра, а значение сигнала задания определяется блоком формирования параметров имитации;

– автоматический режим (переключатели *S1*, *S2* – в положении 2, а *S3* – в положении 1) – система

работает полностью автоматически без вмешательства оператора, задание скорости ветра осуществляется отдельным блоком программной генерации значений скорости ВП (ГСВ). Следует отметить, что значения скорости ветра в этом случае генерируются, опираясь на данные статистической обработки результатов измерения скорости на конкретной местности.

При наличии дополнительного выносного пульта управления (рис. 10) выбор режима работы экспериментального стенда осуществляется, соответственно, с помощью кнопок на пульте.

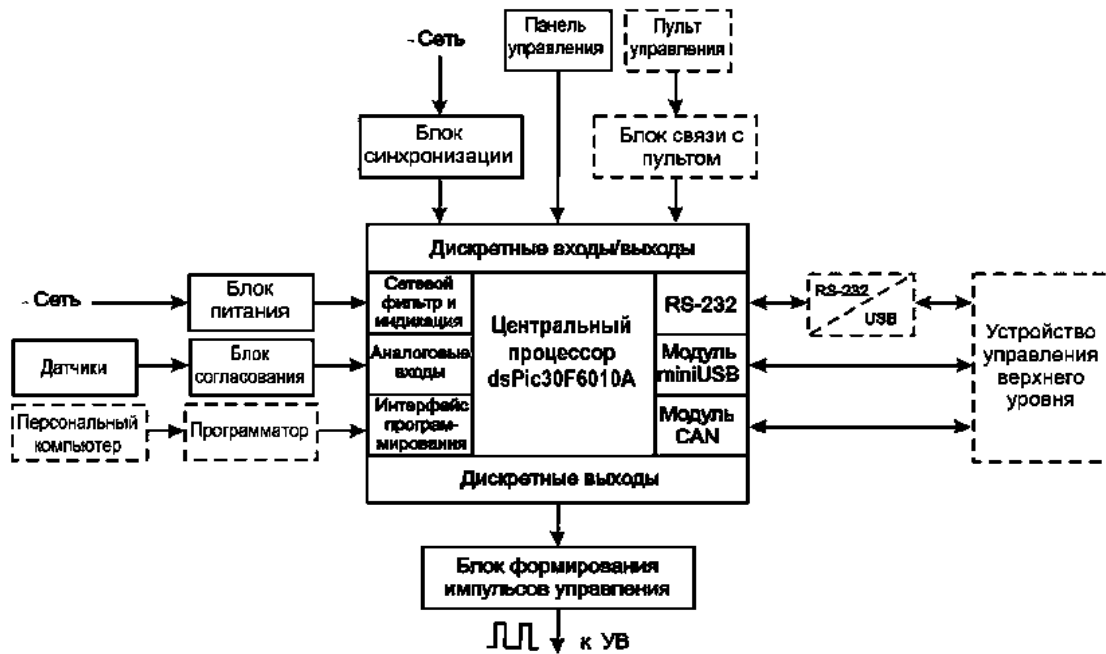


Рисунок 10 – Структура аппаратной части СУ

Основные аппаратные узлы СУ:

1) плата центрального процессора (рис. 11), на которой располагаются:

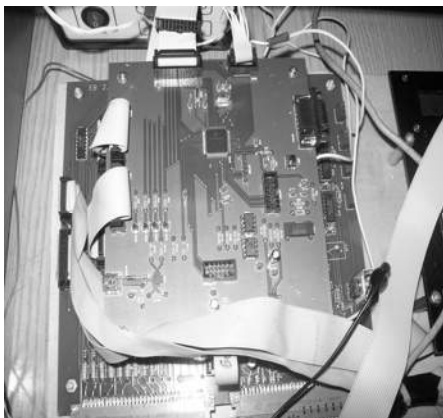


Рисунок 11 – Фотография платы центрального процессора СУ ИВТ

– управляющий микроконтроллер фирмы Micro-Chip dsPIC30F6010A;

– интерфейсные ИМС для организации модулей связи с устройствами управления верхнего уровня; аппаратные модули СУ имитатора дают возможность организовать обмен данными по протоколам RS-232, USB, CAN;

– фильтрующие цепи, цепи сброса управляющего микроконтроллера, светодиодная индикация, а также разъёмы для связи с другими узлами системы управления;

2) блок формирования импульсов управления, который выполняет функции драйвера и построен на базе ИМС типа ULN2803A;

3) блок синхронизации работы системы управления ИВТ с трёхфазной сетью; следует отметить, что за счёт применения оптической развязки каждого канала возможна синхронизация как по линейному, так и по фазному напряжениям сети;

4) блок питания, который обеспечивает необходимые напряжения питания (+5В, +12В, +15В) для всех узлов системы управления, а также внешних измерительных датчиков;

5) блок согласования с аналоговыми сигналами, которые поступают с датчиков;

6) блок связи платы центрального процессора с пультом управления (в случае необходимости увеличения возможностей системы управления); основу пульта составляют матрица кнопок и жидкокристаллический индикатор (ЖКИ);

7) панель управления для задания режимов работы экспериментального стенда при минимальной конфигурации;

8) дополнительные встраиваемые модули преобразования интерфейсов (при необходимости).

В соответствии со структурой системы управления (рис. 9) был разработан обобщенный алгоритм её функционирования (рис. 12), который является основой для разработки программного обеспечения управляющего микроконтроллера.

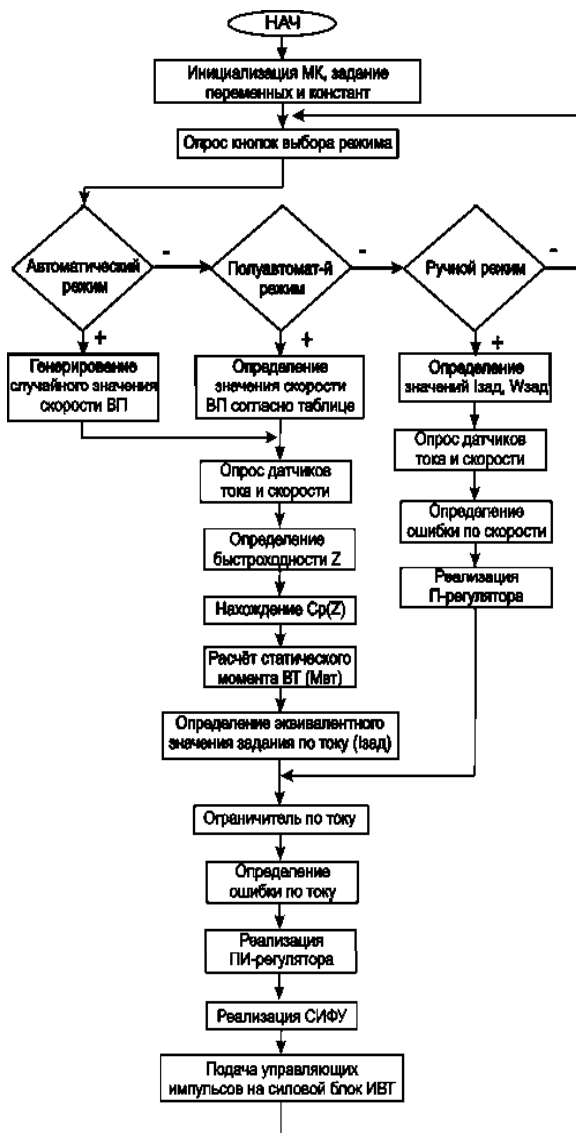


Рисунок 12 – Алгоритм работы управляющего микроконтроллера СУ ИВТ

**ВЫВОДЫ.** 1. Рассмотрены вопросы разработки экспериментального стенда для исследования ЭО ВЭУ малой мощности, начиная от его обобщенной структуры и заканчивая аппаратной реализацией основных узлов.

2. Предложена общая концепция построения системы управления экспериментального стенда ИВТ, в

соответствии с которой разработан обобщенный алгоритм функционирования управляющего микроконтроллера.

3. Разработана гибкая структура системы управления экспериментального стенда с возможностью реализации различных режимов его работы (ручного, полуавтоматического, автоматического) в зависимости от степени участия оператора и способа задания значений скорости ветрового потока. Такое сочетание режимов работы стенда расширяет круг задач, решаемых при проведении экспериментальных исследований.

Представленные в статье результаты являются фундаментом для дальнейших исследовательских работ, а именно, разработки соответствующего программного обеспечения для СУ ИВТ и определения области рабочих режимов предложенного экспериментального стенда, проверки адекватности работы имитирующей системы, обработки статического и динамического режимов работы имитируемой ветротурбины и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Monfared M., Kojabadi H.M., Rastegar H. Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled DC motor// Renewable Energy. – 2008. – Vol. 33. – PP. 906–913.
2. Laboratory set-up for wind turbine emulation / M. Chinchilla, S. Arnaltes, J.L. Rodriguez-Arnenedo // Proceedings of IEEE International Conference Industrial Technology (ICIT'04). – Spain, Madrid, 2004. – Vol. 1. – PP. 553–557.
3. Ming Qiao, Fei Lin, Ruixiang Hao, Xiaojie You, Zheng T.Q. The research and development platform for wind energy system used induction motor replacing wind turbine // 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – 2007. – PP. 2579–2582.
4. Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S. Development of a wind turbine simulator for wind generator testing // International Energy Journal. – 2007. – Vol. 8. – PP. 21–28.
5. Буров А.Н. Состояние и перспективы совершенствования систем имитации поведения ветротурбин // Техническая электродинамика. Тематический выпуск СЭЭ. – 2010. – Часть 2. – С. 38–43.
6. Переверзев А.В., Буров О.М., Алексієвський Д.Г. Вартісний аналіз систем електроприводів імітаторів вітротурбін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63), част. 3. – С. 40–43.
7. Алексеевский Д.Г., Буров А.Н., Бурова А.А. Структура электромеханической системы для имитации характеристик ветротурбин без датчиков на валу двигателя. // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 6/2011 (71), част. 1. – С. 11–16.
8. Переверзев А.В., Буров А.Н., Бурова А.А. Модель электромеханической системы имитации поведения ветротурбины в среде Matlab-Simulink // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – 2011. – Вип. 4 (16). – С. 154–159.
9. Переверзев А.В., Буров А.Н., Панков О.Ю. Выбор электромеханической системы имитатора ветротурбин с учетом влияния порывистого харак-

тера ветрового потоку // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2009. – Вип. 3/2015 (56), част. 1. – С. 35–39.

10. Твайдел Дж., Уайт А. Возобновляемые источники энергии / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.

## AN EXPERIMENTAL STAND FOR RESEARCH OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT OF WIND POWER PLANTS: STRUCTURE AND HARDWARE IMPLEMENTATION

**A. Burov**

Zaporozhye State Engineering Academy

Lenina st., 226, Zaporozhye, 69006, Ukraine. E-mail: aleksey\_200581@mail.ru

The structure of an experimental stand for simulation the behavior of low-power wind turbines based on the series element base is proposed and described. It allows to make research, development and diagnostics of the electrical equipment systems of wind power plants. The general concept of creating the experimental stand, the structure and hardware implementation of its nodes are also considered. A flexible structure of experimental stand control system with the possibility of realization of the different modes, depending on the degree of operator participation and on the way of setting the value of wind flow speed, is offered. The general algorithm of controlling microcontroller functioning is developed.

**Keywords:** wind power plant, wind turbine, simulator, experimental stand, DC driver.

### REFERENCES

1. Monfared, M., Kojabadi, H.M., Rastegar, H. (2008), "Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled DC motor", *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 906–913.
2. Chinchilla, M., Arnaltes, S., Rodriguez-Arnedo, J.L. (2004), "Laboratory set-up for wind turbine emulation", *Proceedings of IEEE International Conference Industrial Technology (ICIT'04)*, Madrid, Spain, vol. 1, pp. 553–557.
3. Ming, Qiao, Fei, Lin, Ruixiang, Hao, Xiaojie, You, and Zheng, T.Q. (2007), "The research and development platform for wind energy system used induction motor replacing wind turbine", *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 2579–2582.
4. Neammanee, B., Sirisumrannukul, S., Chatratana, S. (2007), "Development of a wind turbine simulator for wind generator testing", *International Energy Journal*, vol. 8, pp. 21–28.
5. Burov, A.N. (2010), "The state and perspectives of the improving of wind turbine's behavior simulation systems", *Tekhnicheskaya elektrodynamika: Tematicheskiiy vypusk SEE*, part 2, pp. 38–43.
6. Pereverzev, A.V., Burov, A.N., Alekseevskiy, D.G. (2010), "Cost analysis of the electric drive systems of wind turbine simulators", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, no. 4 (63), vol. 3, pp. 40–43.
7. Alekseevskiy, D.G., Burov, A.N., Burova, A.A. (2011), "A structure of electromechanical system for simulation wind turbines characteristics without sensors on the shaft of the motor", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, no. 6 (71), vol. 1, pp. 11–16.
8. Pereverzev, A.V., Burov, A.N., Burova, A.A. (2011) "The model of electromechanical system for simulation wind turbines behavior in Matlab-Simulink", *Elekromekhanichni i energozberigayuchi systemy*, Shchokvartalnyi naukovo-vyrobnychiy zhurnal, iss. 4 (16), pp. 154–159, Ukraine.
9. Pereverzev, A.V., Burov, A.N., Pankov, O.Yu. (2009), "The choice of electromechanical system of wind turbine simulator taking into account the influence of gusty nature of the wind flow", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, no. 3 (56), vol. 1, pp. 35–39.
10. Tvaidel, Dj., and Uait, A. (1990), *Vozobnovliaemye istochniki energii* [Renewable energy sources] Energoatomizdat, Moscow, USSR.

Стаття надійшла 16.03.2015.