

Канд. техн. наук Н. С. Голубенко<sup>1</sup>, канд. техн. наук Д. Г. Алексеевский<sup>2</sup>,  
д-р техн. наук П. Д. Андриенко<sup>2</sup>, И. Ю. Немудрый<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «ПКТБ «КОНКОРД», г. Днепропетровск,

<sup>2</sup>Запорожская государственная инженерная академия,

<sup>3</sup>ОАО «НИИ «Преобразователь», г. Запорожье

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЭУ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ В РЕЖИМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ВЕТРОТУРБИН

*В статье рассматривается электромеханическая система ветроэнергетической установки на базе схемы с аэродинамическим мультипликатором. Приводится описание математической модели электромеханической системы. Исследуется вопрос об эффективности алгоритма управления ветротурбинами на основе стабилизации их скорости вращения.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, ветротурбина, генератор, система управления, математическая модель.

### Анализ проблемы и постановка задачи

Проблема согласования механических режимов ветротурбины и генератора возникает уже при выборе структуры электромеханической системы ветроэнергетической установки (ВЭУ). Сегодня развиваются и конкурируют на рынке производителей ветроэнергетических установок несколько концепций построения электромеханических систем ВЭУ.

Классическим решением можно считать схему «ветротурбина-мультипликатор-высокоскоростной генератор». Ее главным достоинством являются относительно высокие массогабаритные показатели генератора. К недостаткам следует отнести механические потери энергии в мультипликаторе и дополнительные затраты на его обслуживание.

Успешно конкурирует с классической структурой безмультипликаторная схема «ветротурбина-низкоскоростной генератор». ВЭУ этого класса, например, созданы специалистами компаний EWT, Siemens, ScanWind. Однако эта структура требует больших тяжелых генераторов, способных преобразовывать механическую энергию при малых скоростях и больших моментах на валу ветротурбины.

Еще одной альтернативой является схема с так называемым аэродинамическим мультипликатором [1]. Она сочетает в себе как отсутствие механического мультипликатора, так и возможность применения относительно высокоскоростного генератора.

Особенностью электромеханической системы этого типа является наличие трех каналов преобразования мощности ветрового потока. Одним из алгоритмов управления подобного рода системой является двухзонное регулирование. В первой рабочей зоне регулирование осуществляется при фиксированном угле

установки лопастей ветроколеса. В этом режиме управление системой производится с помощью силового электрооборудования ВЭУ. Во второй зоне, в которой необходимо ограничивать мощность, отбираемую от ветрового потока, регулирование осуществляется путем изменения угла установки лопастей.

Для регулирования электромеханической системы в первой зоне может быть использован способ, в основе которого лежит стабилизация скорости вращения вала ветротурбин путем управления моментами их генераторов. Целью регулирования в первой зоне является достижение максимальной выработки электроэнергии. В связи с этим возникает проблема анализа эффективности предложенного алгоритма управления электромеханической системой.

Данная работа посвящена построению математической модели электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором и исследованию, с ее помощью, вопроса об эффективности предложенного алгоритма.

### Математическая модель системы

На рисунке 1 показана функциональная схема электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором.

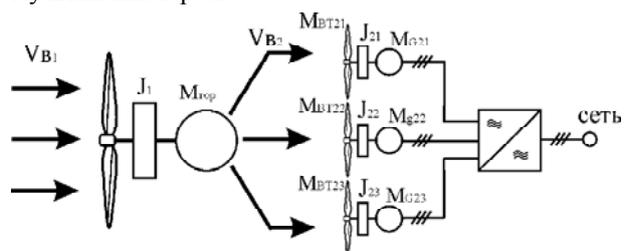


Рис. 1. Функциональная схема электромеханической системы ВЭУ

Первичный ветровой поток  $V_{B1}$  взаимодействует с ветроколесом и передает ей часть кинетической энергии, приводя во вращение ветроколесо с угловой скоростью  $\omega_1$ . Вследствие торможения ветрового потока появляется момент ветроколеса

$$M_{BK} = M_{BK}(V_{B1}, \omega_1). \quad (1)$$

Для его описания удобно использовать известную зависимость коэффициента эффективности отбора мощности ветроколесом  $Cp(z)$  от быстроходности:

$$z = \frac{\omega_1 \cdot R_{BK}}{V_{B1}}, \quad (2)$$

и известную зависимость мощности ветроколеса:

$$P_{BK} = \frac{\rho \cdot S_{BK} \cdot V_{B1}^3 \cdot Cp(z)}{2}. \quad (3)$$

Выразив площадь, ометаемую ветроколесом  $S_{BK}$  через ее радиус  $R_{BK}$ , получаем выражение для момента:

$$M_{BK} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot V_{B1}^3 \cdot R_{BK}^2 \cdot Cp(z)}{2 \cdot \omega_1}. \quad (4)$$

Полученное выражение реализуется в структуре модели блоком А (рисунок 2).

Динамика первичной аэромеханической подсистемы описывается уравнением движения:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{BK}(V_{B1}, \omega_1) - M_{TOP1}(P_{BK}, \omega_1) - M_{TP1}(\omega_1), \quad (5)$$

где  $J_1$  – момент инерции вращающихся масс первичной аэромеханической подсистемы;

$M_{TOP1}(P_{BK}, \omega_1)$  – суммарный момент торможения, вызванный отбором кинетической энергии вращения ветроколеса тремя турбинами;

$M_{TP1}(\omega_1)$  – момент механических потерь первичной аэромеханической подсистемы.

Интегральная форма уравнения (5) с учетом начальных условий –  $\omega_1(0)$  реализуется в структуре модели блоком В (рисунок 2).

Блоки А и В образуют первичную аэромеханическую систему, на выходе которой, с учетом радиуса закрепления генераторов на лопасти  $R_2$ , создается вторичный воздушный поток  $V_{B2}$ .

Вторичный воздушный поток воздействует на три ветротурбины. Таким образом происходит передача кинетической энергии вращения ветроколеса через ветротурбины генераторам. Аэромеханическая подсистема ветротурбины по структуре подобна первичной

подсистеме. Разница заключается в параметрах компонента и в том, что торможение ветротурбин осуществляется генератором с моментом  $M_G$ . Вторичная аэромеханическая система описывается следующими уравнениями:

$$M_{BTn}(V_{B2}, \omega_{2n}) = \frac{\pi \cdot \rho \cdot V_{B2}^3 \cdot R_{BT}^2 \cdot Cp(z)}{2 \cdot \omega_{2n}}, \quad (6)$$

$$J_{2n} \frac{d\omega_{2n}}{dt} = M_{BTn}(V_{B2}, \omega_{2n}) - M_{Gn} - M_{TP2n}(\omega_{2n}). \quad (7)$$

Второе число  $n$  в индексе указывает на номер канала преобразования мощности.

Момент генератора в рассмотренной модели задается электрооборудованием ВЭУ путем регулирования на уровне заданного момента в контуре подчиненного регулирования скоростью ветротурбин. На модели контур регулирования моментом не показан.

Контур регулирования скорости турбин реализуется блоком Е. С помощью блока Е обеспечивается внешний контур обратной связи системы управления.

### Анализ результатов моделирования

С помощью математической модели были получены графики выработки электроэнергии. На рисунке 3 показан график выработки при стабилизации скорости вращения турбин в относительных единицах (сплошная линия) и для сравнения приведен график оптимального отбора мощности при  $Cp = Cp^{max}$  (пунктирная линия). Более детально участок ниже номинальной скорости показан на рисунке 4.

Отклонение фактической мощности от максимальной, в относительных единицах, показано на рисунке 5.

Как можно видеть из графиков, существует достаточно широкий диапазон скоростей ветрового потока, в котором режим ветротурбины практически не отличается от оптимального режима. Таким образом, наблюдается эффект автостабилизации аэромеханической системы ВЭУ в режиме оптимального отбора мощности ветрового потока. Это дает возможность не применять на этом участке сложных алгоритмов управления ВЭУ для обеспечения оптимального отбора мощности.

### Заключение

В работе рассмотрены режимы работы ВЭУ без ограничения мощности нагрузки. Подобная система используется при работе ВЭУ на глобальную сеть, либо при наличии технических устройств по сбросу избытка мощности.

Выявленный эффект автостабилизации аэромеханической системы в оптимальном режиме, безусловно, является одним из существенных преимуществ предложенной концепции построения ВЭУ.

Результаты моделирования могут быть использованы при оптимизации управления ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.

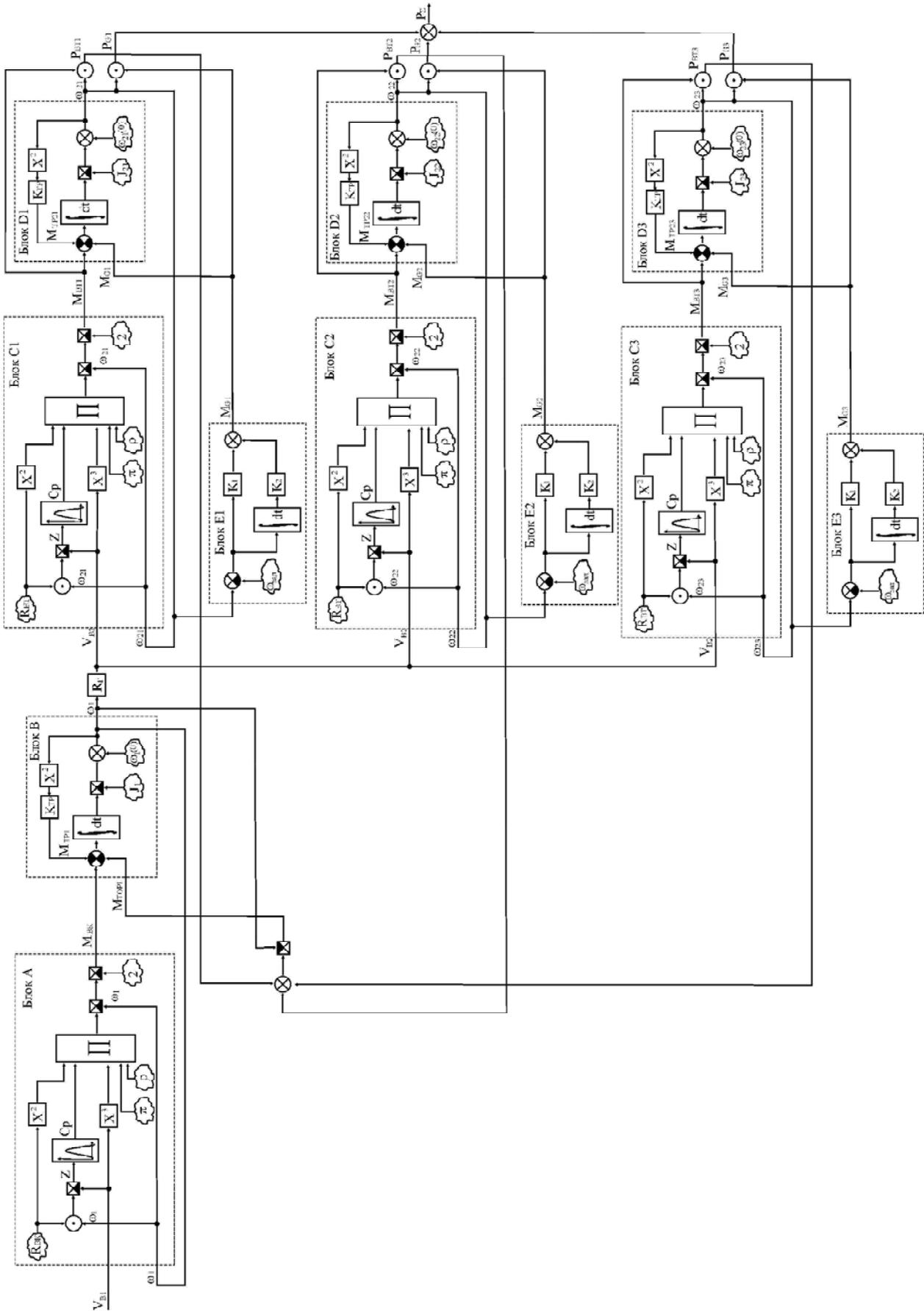


Рис. 2. Блок-схема модели электромеханической системы ВЭУ

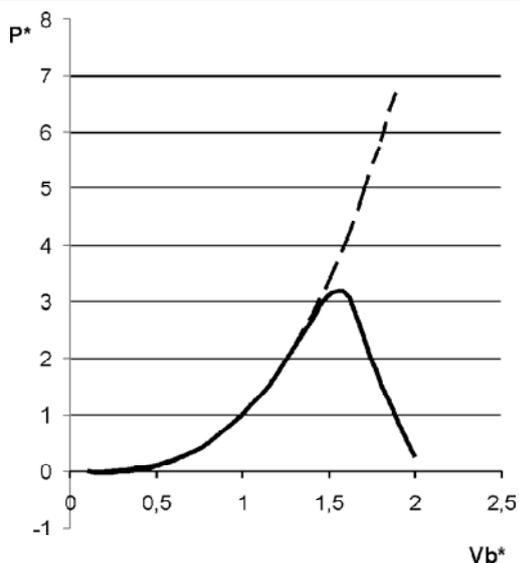


Рис. 3. График выработки ВЭУ

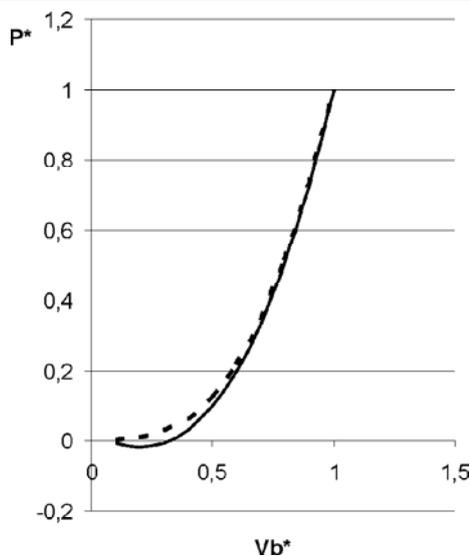


Рис. 4. График выработки ВЭУ (начальный участок)

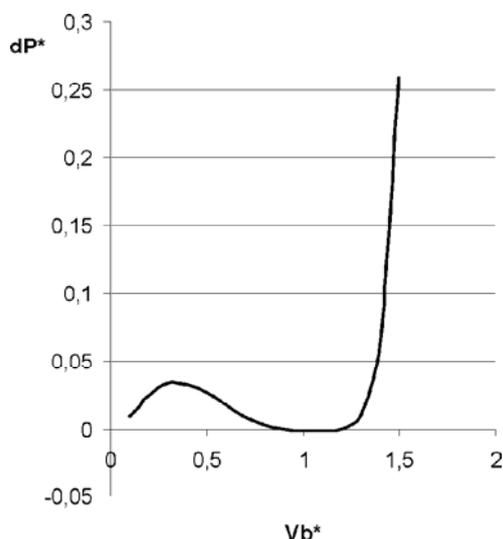


Рис. 5. График отклонения от оптимальной мощности ВЭУ

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тенденции развития ветроэнергетики и безмультипликаторные ветровые установки / [Н. С. Голубенко, С. И. Довгалюк, А. М. Фельдман, В. А. Цыганов] // Нетрадиционная энергетика XXI века : материалы IV Международной конференции. – Крым, Гурзуф, 2003. – С. 68–74.
2. Голубенко Н. С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэнергетической установки большой мощности / Н. С. Голубенко // Нетрадиционная энергетика XXI века : материалы IV Международной конференции. – Крым, Гурзуф, 2003. – С. 125–132.
3. Миргород В. Ф. Управление ветроэнергетической установкой большой мощности по запасам аэродинамической устойчивости / В. Ф. Миргород // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 67–70.

Надійшла до редакції 03.03.2011

#### Голубенко Н.С., Андрієнко, П.Д. Алексієвський Д.Г., Немудрий І.Ю. Моделювання електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікатором в режимі стабілізації швидкості вітротурбін

У статті розглядається електромеханічна система вітроенергетичної установки на базі схеми з аеродинамічним мультиплікатором. Наводиться опис математичної моделі електромеханічної системи. Досліджується питання про ефективність алгоритму керування вітротурбінами на основі стабілізації їх швидкості обертання.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка, вітротурбіна, генератор, система управління, математична модель.

#### Golubenko N., Andriyenko P., Alekseevskiy D., Nemudriy I. Modeling of electromechanical system of wind power station with aerodynamic multiplier in the mode of wind turbines speed stabilization

The article deals with the electromechanical system of wind power plants based on the scheme with an aerodynamic multiplier. A mathematical model of the electromechanical system is described. Investigation of control algorithm efficiency based on wind turbines stabilization is discussed.

**Key words:** wind power, wind turbine, generator, control system, mathematical model.