

Рис. 2. Осциллограмма напряжения на выходных клеммах бортовой части

Предложенная структурная схема автоматического управления уровнем напряжения на выходных клеммах трансформатора, расположенного на борту судна снабжения, в значительной степени решает эту задачу.

Исследованная структура системы электроснабжения может служить базой для разработки линейки систем электроснабжения с электропередачей переменного тока для питания ТПА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rashid M. Power Electronics Handbook. –Cambridge: Elsevier, 2018. – 1522 p.
2. Christ R., Wernly R. The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles. –Oxford: Elsevier Ltd, 2007. – 679 p.
3. Лукас В.А. Теория автоматического управления. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
4. Фролов В.Я. Устройства силовой электроники и преобразовательной техники с разомкнутыми и замкнутыми системами управления в среде Matlab – Simulink. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 332 с.
3. Юдинцев А.Г., Ткаченко А.А., Ляпунов Д.Ю. Методика разработки имитатора нагрузок для наземных испытаний систем электропитания автономных объектов // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 1 (46). – С. 60–66.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

И.А. Разживин, Н.Ю. Рубан, А.С. Гусев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: lionrash@tpu.ru

UNIVERSAL MODEL OF AERODYNAMIC CONVERSION FOR SPECIALIZED PROCESSOR OF WIND TURBINE

I.A. Razzhivin, N.Yu. Ruban, A.S. Gusev

National Research Tomsk Polytechnic University

Annotation. *The article deals with a universal model of aerodynamic transformation of a wind power plant. This model is implemented in specialized software-hardware hybrid simulation tool and is intended for a comprehensive solution to the design and operation of power systems with wind power plants, and can also be used for further research of problems associated with a change in the total inertia in power systems with wind power plants and the development of techniques settings of automatic devices to prevent stability violation.*

Энергия ветра считается одной из самых перспективных и наиболее конкурентоспособных экологически чистых источников энергии. Использование

ветроэнергетических установок (ВЭУ) способствует покрытию растущего потребления электроэнергии во многих развитых странах Европы, США, Канаде, на Ближнем Востоке и др. Важным аспектом в решении большинства задач исследования, проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) с ВЭУ является их математическое моделирование, гарантированная приемлемая точность которого определяется двумя факторами: полнотой и достоверностью математической модели и вычислительной способностью и возможностью программных и программно-аппаратных средств моделирования. Авторами предлагается использовать специализированный программно-аппаратный инструмент гибридного моделирования собственной разработки – Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [1]. ВМК РВ ЭЭС – это многопроцессорный комплекс, который объединяет в себе набор специализированных процессоров (СП), моделирующих все основное и вспомогательное оборудование моделируемой ЭЭС. Гибридный подход предполагает моделирование на цифровом, аналоговом и физическом уровнях.

Авторами был разработан специализированный процессор (СП) для моделирования ВЭУ 4-го в составе ВМК РВ ЭЭС [2, 3], в котором реализована модель аэродинамического преобразования ВЭУ, позволяющая получить механический момент $M_{ВЭУ}$ на валу ветроколеса (ВК) [4,5]:

$$M_{ВЭУ} = \frac{P_{МЭХ}}{\omega} = \frac{\rho \pi R^2 V^3 C_P(Z, \beta)}{2\omega},$$

где $P_{МЭХ}$ – механическая мощность развиваемая ВК, C_P – коэффициент использования энергии ветра; ω – угловая частота вращения ВК, ρ – плотность воздуха; πR^2 – площадь, ометаемая ВК; R – радиус ветроколеса; V – скорость ветра, с учетом его турбулентной составляющей, β – угол атаки лопастей ветроколеса, Z – быстроходность ВК.

Реализация математической модели аэродинамического преобразования и других систем автоматического управления ВЭУ в СП на цифровом уровне в микроконтроллере AT91SAM7X256 на базе ARM с применением Ассемблера, что позволяет ускорить процесс моделирование. Разработанная система является универсальной для любого типа ВЭУ и представлена на рис.1.

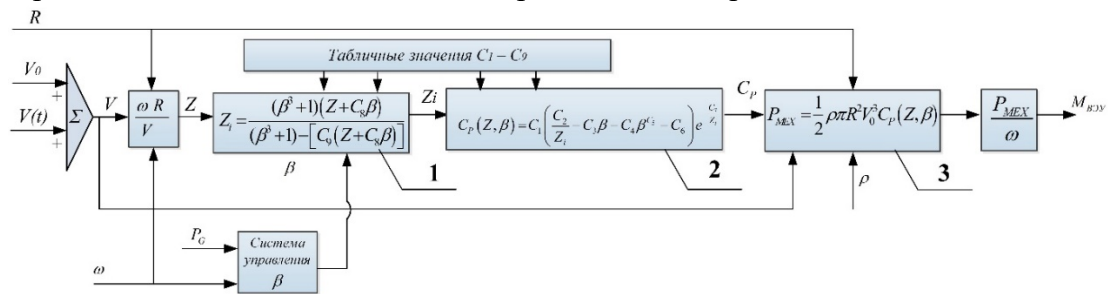


Рис. 1. Функциональная схема математической модели аэродинамического преобразования ВЭУ: V_0 – средняя скорость ветра; $V(t)$ – турбулентная составляющая скорости ветра; блок 1 – математическая модель быстроходности Z_i ; блок 2 – математическая модель C_P ; блок 3 – математическая модель расчета $P_{МЭХ}$.

Возможные коэффициенты $C_1 - C_9$ для разных типов турбин представлены в таблице 1. В современных ВЭУ применяется активное управление β – «Pitch»-регулирование [6].

Такое управление позволяет плавно пускать и аварийно останавливать ВК, осуществлять работу ВЭУ в точке выдачи максимальной мощности при разных скоростях ветра.

Кроме того, при некоторой модификации «Pitch»-регулирование в ряде стран используют с целью резерва мощности и возможности и участия в частотном регулировании [7, 8], а также такое регулирование имеет некоторое влияние на виртуальное управление инерцией.

Таблица 1 – Коэффициенты для ветровых турбин [4, 5]

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Универсальные	0,5	116	0,4	0	-	5	21	0,08	0,035
ВЭУ с переменной скоростью вращения 3 и 4 тип	0,73	151	0,58	0,002	2,14	13,2	18,4	-0,02	-0,003

Описанную модель аэродинамического преобразования с контроллером управления углом β предполагается применять для исследования ряда задач, связанных не только с вопросами проектирования и эксплуатации ЭЭС с ВЭУ в различных режимах работы, но и для решения задач участия ВЭУ в частотном регулировании ЭЭС, исследовании проблем, связанных с изменением суммарной инерции в ЭЭС с ВЭУ и разработке методик настройки устройств автоматики предотвращения нарушения устойчивости.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № МК-1675.2019.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем // Известия Вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9.10/1. – С. 164.–170.
2. Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Аскарлов А.Б., Уфа Р.А. Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа // Вестник Иркутского государственного технического университета. –2020. –Т. 24.– № 1. – С. 183–194.
3. Разживин И.А., Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Киевец А.В. Синтез математической модели ветротурбины для достоверной оценки влияния ветроэнергетики на режимы работы энергосистем. // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2019. – № 6 (119). – С. 10–15.
4. Heier, S. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems. – UK: John Wiley & Sons Inc., 2014. – 520 p.
5. Wind power in power systems / edited by Thomas Ackermann. — 2nd ed. – Chichester.: Wiley, 2012. – 1120 p.
6. Разживин И.А., Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Андреев М.В. Разработка математической модели автоматического управления углом тангажа для специализированного гибридного процессора ветроэнергетической установки 4 типа // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2020. – № 10 (135). – С. 4–11.
7. Requirements for Offshore Grid Connections in the E.ON Netz Network. E.ON Netz grid code report. – Bayreuth.: E.ON Netz GmbH, 2008.– 14 p.
8. Li P., Hu W., Hu R. and Chen Z. The integrated control strategy for primary frequency control of DFIGs based on virtual inertia and pitch control // Innovative smart grid technologies: proceedings of the International Conference. – 2016 – P. 430–435.