

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОУСТАНОВКИ С РЕЗЕРВНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

А.Д. Никитин, Н.Н. Акифьева

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Проведено математическое моделирование работы автономной системы, включающей ветровую турбину, асинхронный генератор, синхронный компенсатор, дизельный двигатель в качестве резервного источника и переменную регулируемую нагрузку. Использована нестандартная модель для задания скорости ветра, включающая случайные колебания, порывы и затишья. По результатам моделирования при номинальной мощности системы 275 кВт и линейном напряжении 380 В колебания частоты при регулировании не превышают 1 Гц, колебания напряжения менее 15 В.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроэнергетическая установка, математическое моделирование, переходные процессы, регулирование мощности.

Одной из проблем ветроэнергетики является значительная неравномерность выработки энергии ветроустановкой (ВЭУ) в течение времени. Известно, что вырабатываемая ВЭУ мощность пропорциональна кубу скорости ветра, и, так как скорость ветра стохастически изменяется, то соответственно изменяется и мощность ВЭУ. В результате изменения выработки энергии ВЭУ нарушается баланс энергосистемы, в которой функционирует ВЭУ, вследствие чего изменяются частота и напряжение переменного тока в энергосистеме. Однако для нормальной работы потребителей электроэнергии необходимо поддерживать частоту и напряжение постоянными и равными регламентированным значениям. Особенно остро данная проблема стоит в автономных системах, где источником энергии являются только ВЭУ, и источники других видов не могут скомпенсировать изменение энергетического баланса.

В данной работе рассматривается автономная система, состоящая из ветротурбины с асинхронным генератором и синхронным компенсатором, дизельного двигателя в качестве резервного источника, основной и регулирующей нагрузки. Для исследования переходных процессов в этой системе применяется математическое моделирование, получившее в последнее время широкое распространение для изучения работы установок возобновляемой энергетики. Моделирование переходных процессов позволяет оптимальным образом подобрать оборудование и настроить систему регулирования, а также установить пределы изменения параметров качества электроэнергии.

Несмотря на большое число исследований в области моделирования работы ветроустановок,

системы с дополнительной регулирующей нагрузкой остаются малоизученными. Как правило, для компенсации неравномерности выработки энергии ВЭУ используются аккумуляторные батареи, поэтому моделируются именно такие системы [1, 2]. Кроме этого, при моделировании работы ВЭУ скорость ветра представляется как ступенчатое воздействие [1], как равномерно растущая величина [3], как синусоида [4], либо как специфическая функция [5]. В каждом случае отсутствуют значительные изменения скорости ветра, вызывающие наибольшие изменения частоты, напряжения и других параметров модели ВЭУ. В связи с этим представляет интерес моделирование переходных процессов при регулировании работы ВЭУ с помощью дополнительной нагрузки при значительных колебаниях скорости ветра.

В качестве основы из библиотеки MATLAB Simulink взята модель автономной ветровой турбины с асинхронным генератором, разработанная в компании Hydro-Quebec. Исходная модель состоит из следующих элементов: ветровой турбины, заданной в виде таблицы зависимости крутящего момента на валу турбины от скорости ветра и угловой скорости вращения вала генератора; асинхронного генератора мощностью 275 кВА; синхронного компенсатора мощностью 300 кВА с регулятором возбуждения; компенсирующей емкости реактивной мощностью 75 кВАр; основной нагрузки мощностью 50 кВт; регулирующей нагрузки переменной мощности от 0 до 447 кВт, состоящей из восьми ступеней, мощность первой ступени равна 1,75 кВт, мощность каждой последующей ступени вдвое больше мощности предыдущей, каждая ступень включается отдельным

ключом по сигналу от регулятора частоты, в основе которого лежит дискретный пропорционально-интегрирующий контроллер; выходной сигнал контроллера преобразуется в двоичный восьмибитовый сигнал, управляющий подключением регулирующей нагрузки (каждый бит управляет отдельным ключом ступени нагрузки).

В случае практического применения описанной схемы в качестве регулирующей нагрузки может использоваться набор электрических тэнов различной мощности, нагревающих воду для отопления или горячего водоснабжения с применением бака-аккумулятора.

Для решения задач, более соответствующих практике, в исходной модели были сделаны следующие изменения. Во-первых, таблица, используемая для моделирования ветровой турбины, заменена на элемент Wind Turbine из библиотеки Simulink, что позволяет применять модель для исследования работы любых ветротурбин. Для автоматического построения характеристик турбины необходимо задать ее мощность и номинальную (базовую) скорость ветра.

Во-вторых, в структуру модели включен дизельный двигатель и система управления его подключением. Двигатель моделируется как источник постоянного момента на валу асинхронного генератора. Значение момента выбрано так, чтобы дизель обеспечивал мощность основной нагрузки (50 кВт). Дизель подключается в том случае, когда мощность ветротурбины недостаточна для обеспечения основной нагрузки. Кроме этого, при высо-

кой скорости ветра ветротурбина в целях безопасности отключается, и для обеспечения основной нагрузки подключается дизель. Система управления подключением дизеля в модели состоит из двух последовательно соединенных ключей, выходной сигнал каждого ключа равен одному из входных сигналов в зависимости от значения сигнала на управляющем входе (то есть выходной сигнал равен или моменту ветротурбины, или моменту дизеля). Управляющим сигналом является момент на валу ветротурбины.

Кроме этого, уточнено значение мощности минимальной ступени регулирующей нагрузки, отложено измерение тока и напряжения, подобраны оптимальные параметры настройки (коэффициент усиления, постоянная времени интегрирования и постоянная времени дифференцирования) регулятора частоты.

Схема отлаженной модели изображена на рис. 1.

В основе модели – баланс моментов на валу генератора, который характеризуется уравнением

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H(T_m - F\omega - T_e)}, \quad (1)$$

где H – момент инерции ротора; T_m – механический момент на валу генератора, создаваемый турбиной; F – коэффициент трения; ω – угловая частота вращения вала; T_e – электромагнитный момент.

Механический момент, создаваемый турбиной, зависит от скорости ветра и связан через уг-

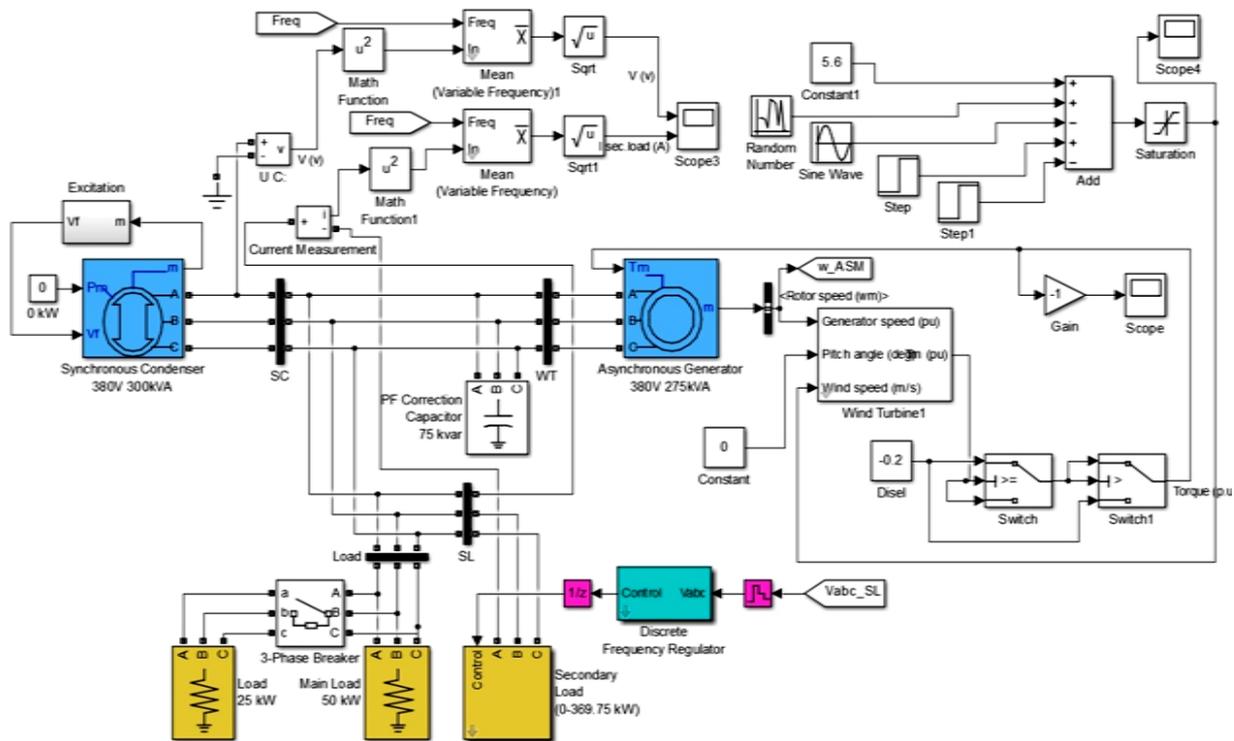


Рис. 1. Схема отлаженной модели

Альтернативные источники энергии

ловую частоту вращения с ее механической мощностью, которая задается как функция от скорости ветра и угловой частоты вращения вала:

$$P_m^* = k_p \cdot c_p^*(\omega, u) \cdot u^{*3}, \quad (2)$$

где P_m^* – механическая мощность турбины в относительных единицах (базовое значение – номинальная мощность); k_p – механическая мощность турбины при базовой скорости ветра и базовой частоте вращения вала; c_p^* – коэффициент использования энергии ветра в относительных единицах (базовое значение – коэффициент при номинальной вырабатываемой мощности турбины); u^* – скорость ветра в относительных единицах (базовое значение – номинальная скорость ветра).

Коэффициент использования энергии ветра рассчитывается следующим образом:

$$c_p(\omega, u) = c_1 \left(\frac{c_2 u}{\omega} - c_4 \right) e^{-\frac{c_5 u}{\omega}} + \frac{c_6 \omega}{u}, \quad (3)$$

где c_1 – c_6 – постоянные коэффициенты.

Асинхронный генератор моделируется на основе Т-образной схемы замещения. Электромагнитный момент вычисляется по формуле

$$T_e = 1,5p(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}), \quad (4)$$

где p – число пар полюсов; Φ_{ds} , Φ_{qs} – магнитные потоки статора по осям d и q ; i_{qs} – ток статора по оси q ; i_{ds} – ток статора по оси d .

Также в систему уравнений, описывающих асинхронный генератор, входят соотношения:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega \Phi_{ds};$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega \Phi_{qs};$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\Phi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega p) \Phi'_{dr};$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\Phi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega p) \Phi'_{qr}; \quad (5)$$

$$\Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr};$$

$$\Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr};$$

$$\Phi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs};$$

$$\Phi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds};$$

$$L_s = L_{ls} + L_m;$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m,$$

где R_s , L_{ls} – сопротивление и индуктивность статора; L_m – индуктивность взаимной индукции; R'_r , L'_{lr} – приведенные сопротивление и индуктивность ротора; V_{qs} , i_{qs} – напряжение и ток статора по оси q ; V_{ds} , i_{ds} – напряжение и ток статора по оси d ; V'_{qr} , i'_{qr} – напряжение и ток ротора по оси q ; V'_{dr} , i'_{dr} – напряжение и ток ротора по оси d ; Φ'_{qr} , Φ'_{dr} – магнитные потоки ротора по осям q и d .

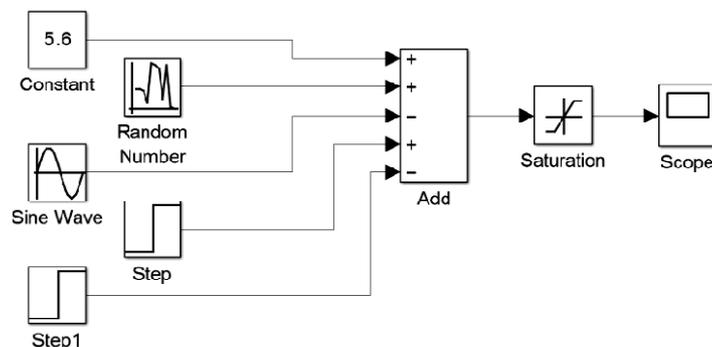


Рис. 2. Модель для построения массива скорости ветра

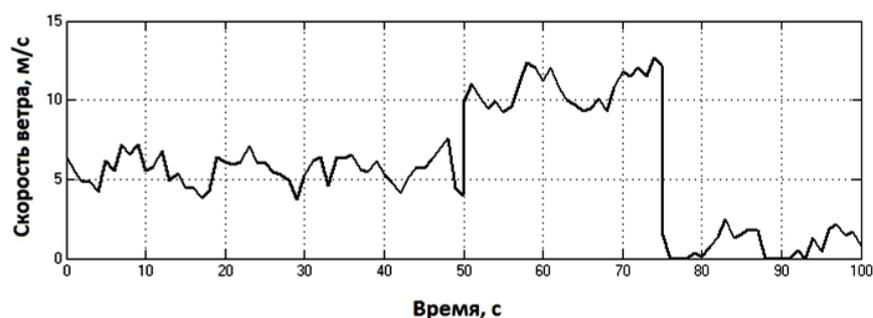


Рис. 3. Массив скорости ветра

То есть электромагнитный момент зависит от тока нагрузки (тока статора), который в свою очередь определяется ее мощностью.

Таким образом, при высокой скорости ветра на валу турбины возникает избыточная механическая мощность, и угловая частота вращения вала асинхронного генератора и частота переменного тока возрастают. Изменение частоты обрабатывается регулятором частоты, который вырабатывает сигнал на включение регулирующей нагрузки для потребления избыточной мощности. При низкой скорости ветра из-за недостатка мощности, вырабатываемой турбиной, частота снижается, и регулятор частоты отключает регулирующую нагрузку.

Скорость ветра моделируется как сумма сигналов различных источников: постоянного источника, равного среднегодовой скорости ветра в заданной местности, источника-генератора случайных чисел по нормальному распределению, синусоидального источника, создающего плавное изменение скорости ветра, и двух ступенчатых источников, первая ступень значительно увеличивает

ет скорость ветра, а вторая уменьшает до значений, близких к нулю (рис. 2). Кроме этого, так как скорость ветра не может быть отрицательной, результирующее значение фильтруется. Массив скорости ветра изображен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, скорость ветра сначала колеблется около среднего значения, затем резко увеличивается (порыв ветра), далее значительно уменьшается (затишье). Подобный характер изменения скорости ветра достаточно реалистичен, особенно для районов, расположенных на побережье крупных рек и озер или морей.

На рис. 4–8 приведены графики, полученные в результате моделирования с использованием массива скорости ветра.

Как видно из рис. 3 и 4, при скорости ветра более 6,5 м/с (после 50-й секунды) мощность, вырабатываемая генератором, превышает максимальное допустимое значение, и ветротурбина отключается, подключается дизельный двигатель. При этом значение механической мощности резко изменяется (от 1,2 до 0,2 номинальной мощности

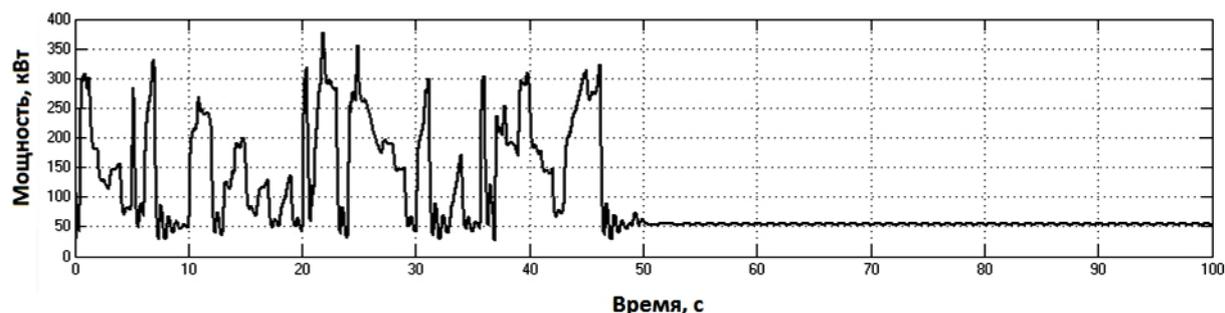


Рис. 4. Активная мощность, вырабатываемая асинхронным генератором

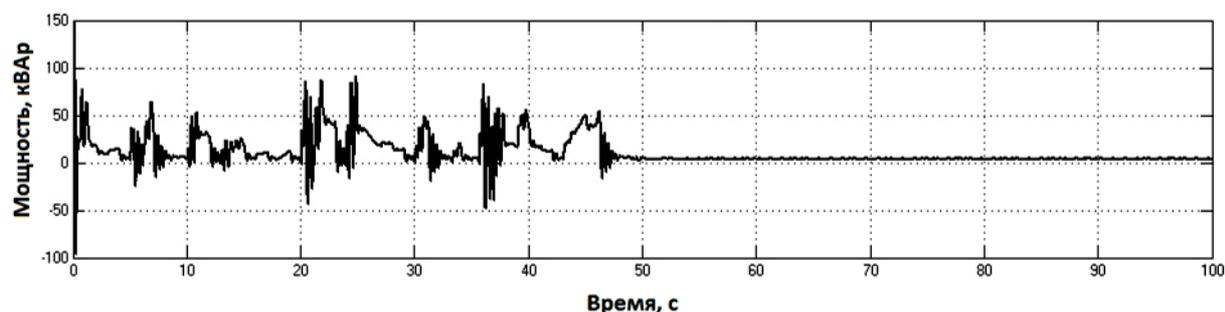


Рис. 5. Реактивная мощность, вырабатываемая синхронным компенсатором

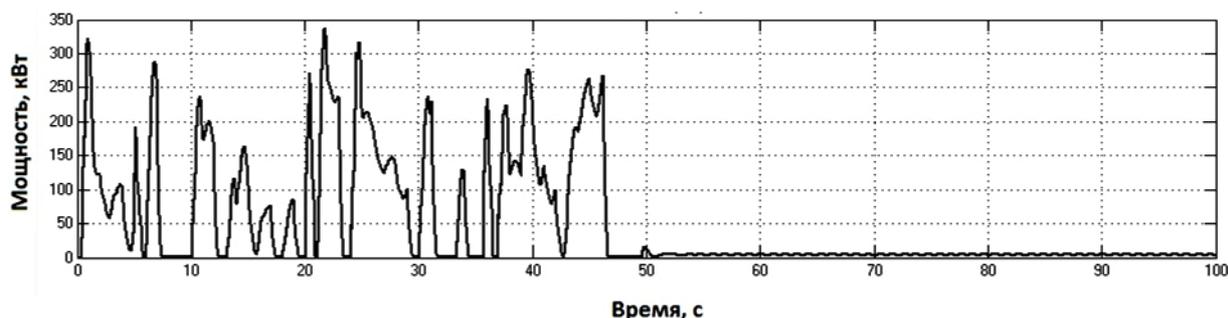


Рис. 6. Мощность, потребляемая регулирующей нагрузкой

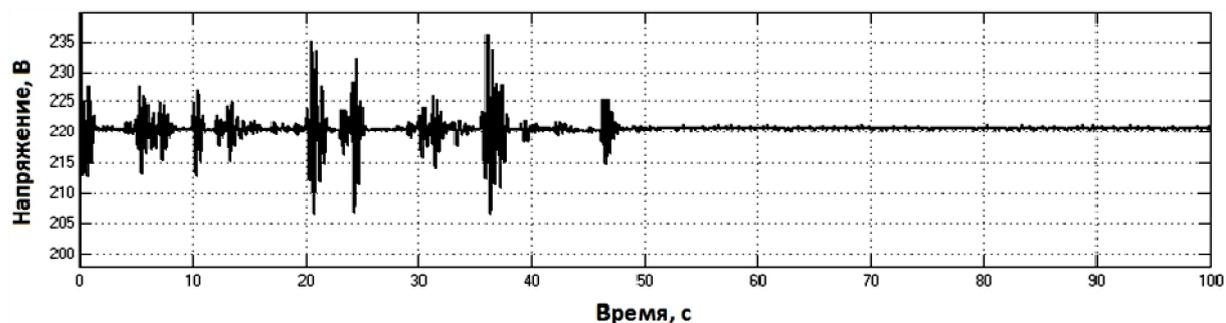


Рис. 7. Фазное напряжение на шине генератора

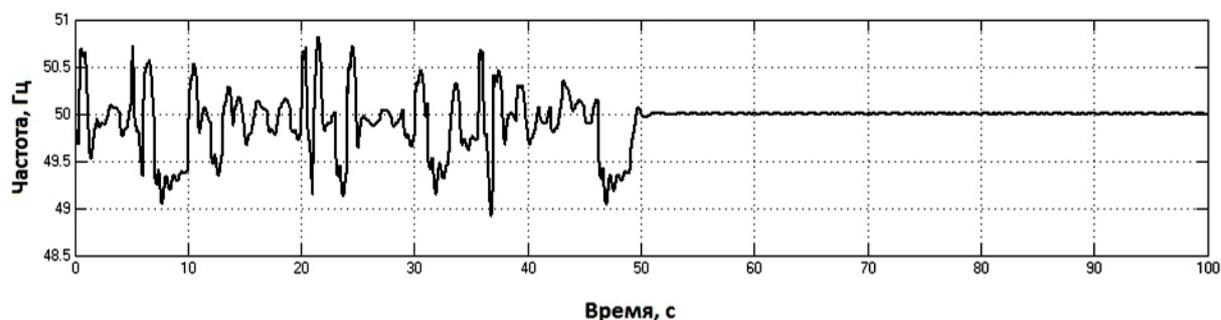


Рис. 8. Частота переменного тока в системе

генератора), и возникает значительный скачок параметров системы. Наиболее крупные скачки параметров системы (в том числе напряжения и частоты) происходят при колебаниях скорости ветра около граничного значения, при котором несколько раз в течение короткого промежутка времени происходит переключение на дизель и обратно (20-я и 36-я секунды).

Из рис. 5 видно, что вырабатываемая реактивная мощность не превышает 100 кВАр, поэтому установленная мощность синхронного компенсатора, равная 300 кВА, является избыточной.

Обобщая результаты моделирования, можно сделать следующие выводы. Ветровая турбина обеспечивает необходимую выработку мощности в достаточно узких пределах изменения скорости ветра. При скорости более 6,5 м/с мощность ветротурбины избыточна, а при скорости менее 4 м/с недостаточна для системы. В этом случае источником энергии для основной нагрузки служит дизельный двигатель.

При заданных параметрах модели колебания частоты не превышают 1 Гц, колебания напряжения менее 15 В. Значения колебаний можно уменьшить, если снизить максимальную допустимую мощность ветротурбины и повысить мощность дизельного двигателя (что нецелесообразно, так как избыточная мощность будет потребляться регулирующей нагрузкой без совершения полезного эффекта основной нагрузкой, и эффективность

системы снизится). Также возможно снижение колебаний за счет оптимизации параметров регулятора частоты.

Литература

1. Нгуен Минь Дык. Моделирование фотоветроэнергетической установки в среде Matlab Simulink / Нгуен Минь Дык // *Современные техника и технологии: сб. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – Т. 1. – С. 82–83.
2. Разработка многофункционального энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии / А.Н. Долуденко, Т.Ю. Жораев, А.Н. Новиков и др. – <http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=20f0999e-e0cc-4660-a775-7f8ff0e7adbс>.
3. Пронин, Н.В. Модель ветрогенератора ВЭУ-3 в пакете Matlab / Н.В. Пронин, А.С. Мартыанов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2012. – Вып. 18. – С. 143–145.
4. Колосов, Р.В. Моделирование ветроэнергетических установок / Р.В. Колосов, В.Г. Титов, Г.М. Мирясов // *Вестник Чувашского университета.* – 2014. – № 2. – С. 27–32.
5. Санкевич, С.А. Моделирование системы управления ветроэлектрической установки / С.А. Санкевич, Ю.Н. Петренко // *Системный анализ и прикладная информатика.* – 2015. – № 1. – С. 35–40.

Никитин Александр Дмитриевич, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; studentshurik@gmail.com.

Акифьева Наталья Николаевна, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; nna_1@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 октября 2015 г.

DOI: 10.14529/power160106

SIMULATION OF TRANSIENT PROCESSES AT OPERATION OF STAND-ALONE WIND TURBINE WITH BACKUP POWER SOURCE

A.D. Nikitin, studentshurik@gmail.com,

N.N. Akifeva, nna_1@mail.ru

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

The paper presents the mathematical simulation of operation of the stand-alone system composed of a wind turbine, induction generator, synchronous condenser, diesel engine as a backup power source and a variable control load. The non-standard model is used to set the wind speed; it considers random fluctuations, gusts and calm periods. Results of the simulation at nominal output of 275 kW and 380 V line voltage prove that frequency variations during regulation do not exceed 1 Hz, whilst voltage fluctuations are less than 15 V.

Keywords: wind power engineering, wind power facility, mathematic modeling, transient processes, power regulation.

References

1. Nguyen Minh Duc. [Modeling Photo Windmill Environment Matlab Simulink]. *Sovremennyye tekhnika i tekhnologii: sbornik trudov XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. [Modern Techniques and Technologies: a Collection of the Works of XIX International Scientific-Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists]. Tomsk, TPU, 2013, vol. 1, pp. 82–83. (in Russ.)
2. Doludenko A.N., Jora T.Y., Novikov A.N. et al. *Razrabotka mnogofunktional'nogo energeticheskogo kompleksa na osnove gibridnoy vetrodizel'noy ustanovki s nakopitelem energii*. [Development of a Multifunctional Energy Sector on the Basis of a Hybrid Wind-Diesel Plants with Energy Storage]. Available at: <http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=20f0999e-e0cc-4660-a775-7f8ff0e7adbc>.
3. Pronin N.V., Mart'yanov A.S. [Model Wind Turbine WT-3 Package Matlab]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2012, no. 18, pp. 143–145. (in Russ.)
4. Kolosov R.V., Titov V.G., Miryasov G.M. [Modeling of Wind Turbines]. *Bulletin of the University of Chuvashia*, 2014, no. 2, pp. 27–32. (in Russ.)
5. Sankevich S.A., Petrenko Yu.N. [Modeling of Wind Turbine Control System]. *System Analysis and Applied Computer Science*, 2015, no. 1, pp. 35–40. (in Russ.)

Received 3 October 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Никитин, А.Д. Моделирование переходных процессов при работе автономной ветроустановки с резервным источником энергии / А.Д. Никитин, Н.Н. Акифьева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 36–41. DOI: 10.14529/power160106

FOR CITATION

Nikitin A.D., Akifeva N.N. Simulation of Transient Processes at Operation of Stand-Along Wind Turbine with Backup Power Source. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 36–41. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160106