

## Компьютерное моделирование сетевой ветроэнергетической установки с асинхронным генератором

РАМАДАН АМЕР, ЕЛИСТРАТОВ В. В.

Для обеспечения высокого качества электроэнергии и энергетической безопасности эксплуатации ветроэнергетических установок (ВЭУ) разработаны математические модели элементов ВЭУ и выбрано программное обеспечение (ПО) для моделирования. Обосновано, что наиболее подходящим ПО, которое успешно используется для создания моделей различных ветроэнергетических систем, в том числе ВЭУ, является MATLAB Simulink. Приведены результаты имитационного моделирования сетевой ВЭУ с асинхронным генератором в среде MATLAB Simulink для исследования режимов работы и отладки работы генерирующего оборудования ВЭУ. Разработаны четыре математические модели элементов ВЭУ: ветроколеса, аэродинамического регулирования, механической части и электрической части, включающей генератор, трансформатор, конденсатор и электрическую сеть большой мощности. Исследования режимов работы проводилось на ВЭУ Siemens SWT 1.3 МВт. Рассмотрены основные режимы: пуск, рабочие режимы, режим короткого замыкания, остановка.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, асинхронный генератор, качество электроэнергии, модель электромеханического оборудования, режимы работы, моделирование, MATLAB Simulink

При подключении и эксплуатации ветровых электростанций (ВЭС), особенно в условиях массового развития ветроэнергетики в мире и планируемого развития в России, существует ряд проблем с работой ВЭС в энергосистеме, которые связаны в основном с высокой изменчивостью условий окружающей среды и ветрового режима, влияющих на выработку и качество электроэнергии, а также – с явлениями, характерными для механических и электрических устройств, входящих в состав ВЭУ [1, 2].

Для обеспечения высокого качества электроэнергии и энергетической безопасности эксплуатации ВЭУ необходимо разработать математические модели отдельных элементов ВЭУ, и для создания моделей необходимо выбирать подходящее программное обеспечение для моделирования. Одним

из инструментов, которые успешно используются для создания моделей различных систем, является MATLAB Simulink.

Программное обеспечение MATLAB представляет собой интерактивную среду программирования и язык программирования высокого уровня, созданный компанией The Math Works. Программное обеспечение MATLAB позволяет использовать блоки базовых математических функций для создания всех перечисленных систем. MATLAB представляет собой пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений [3].

Сетевая ВЭУ с асинхронным генератором состоит из четырех основных энергетических элементов: ветроколеса; системы аэродинамического регулирования лопастей; механической части (ротор ветроколеса, ротор генератора, валы и между ними

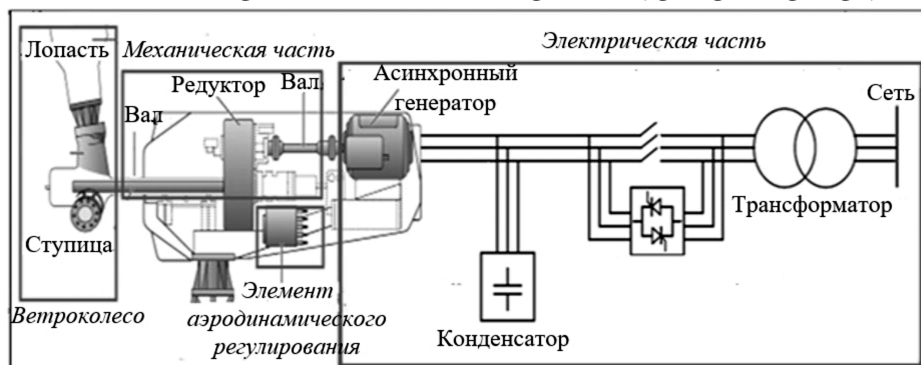


Рис. 1. Блок-схема сетевой ВЭУ с асинхронным генератором

редуктор) и электрической части (асинхронный генератор, трансформатор, конденсатор и электрическая сеть большой мощности) [4]. Схема сетевой ВЭУ с асинхронным генератором показана на рис. 1.

Математические модели элементов ВЭУ в среде MATLAB Simulink разработаны для ВЭУ марки Siemens SWT 1.3 МВт. Технические и электрические характеристики ВЭУ SWT 1.3 МВт приведены далее [5]:

Ротор:

диаметр колеса	62 м
высота ступицы	68 / 90 м
скорость вращения	13 / 19 об/мин

Скорость ветра:

стартовая	3–4 м/с
номинальная	14 м/с
останавливающая	25 м/с

Генератор (асинхронный)

номинальная мощность	1300 кВт
номинальное напряжение	690 В
частота вращения	1000/1500 об/мин
число полюсов	6/4

Редуктор с передаточным числом 1:78  
 Регулирование – активный stall с постоянной частотой вращения ветроколеса  
 Кривая мощности – см. рис. 2

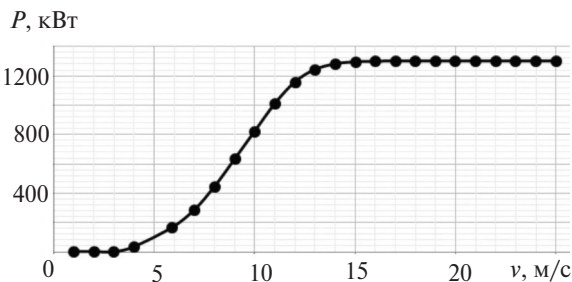


Рис. 2. Кривая мощности для SWT 1/3 МВт/62 (Siemens)

Модели элементов ВЭУ. Модели элементов ВЭУ реализованы в среде MATLAB Simulink.

Модель ветроколеса отражает поведение ветроколеса ВЭУ на основе основных аэродинамических характеристик. В модели ветроколеса ВЭУ учитывается взаимодействие массы воздушного потока с ветроколесом. Входными параметрами модели являются угловая скорость вращения ветроколеса  $\omega$ , скорость ветра  $u$  и угол атаки  $\beta$ , определяемый из модели аэродинамического регулирования лопастей. Основными выходными параметрами модели являются аэродинамический (механический) момент на валу ветроколеса  $T_{BK}$  и механическая мощность ветроколеса  $N_{BK}$ , зависящие от скорости ветра, аэродинамических характеристик ветроколеса и угловой скорости вращения ветроколеса [6]:

$$\left. \begin{aligned} T_{BK}(\omega) &= \frac{1}{2} \rho u^2 FRm(Z); \\ N_{BK}(Z, \beta) &= \frac{1}{2} \rho u^3 FC_p(Z, \beta), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – скорость ветра (осредненная по ометаемой площади ветроколеса), м/с;  $F$  – ометаемая площадь ветроколеса, м<sup>2</sup>;  $R$  – радиус ветроколеса, м;  $m$  – коэффициент ветроколеса момента;  $\omega$  – угловая частота вращения ветроколеса, рад/с;  $C_p$  – коэффициент использования энергии ветра;  $Z$  – быстроходность ветроколеса;  $\beta$  – угол атаки, град.

В MATLAB модель ветроколеса реализована с помощью блоков Simscape Power Systems™ и показана на рис. 3.

Коэффициент  $C_p$  определяется по формуле [7]:

$$C_p(Z, \beta) = 0,22 \left[ \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta \right) - 5 \right] e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}}; \quad (2)$$

$$\lambda_i = 1 / \left( \frac{1}{Z + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)$$

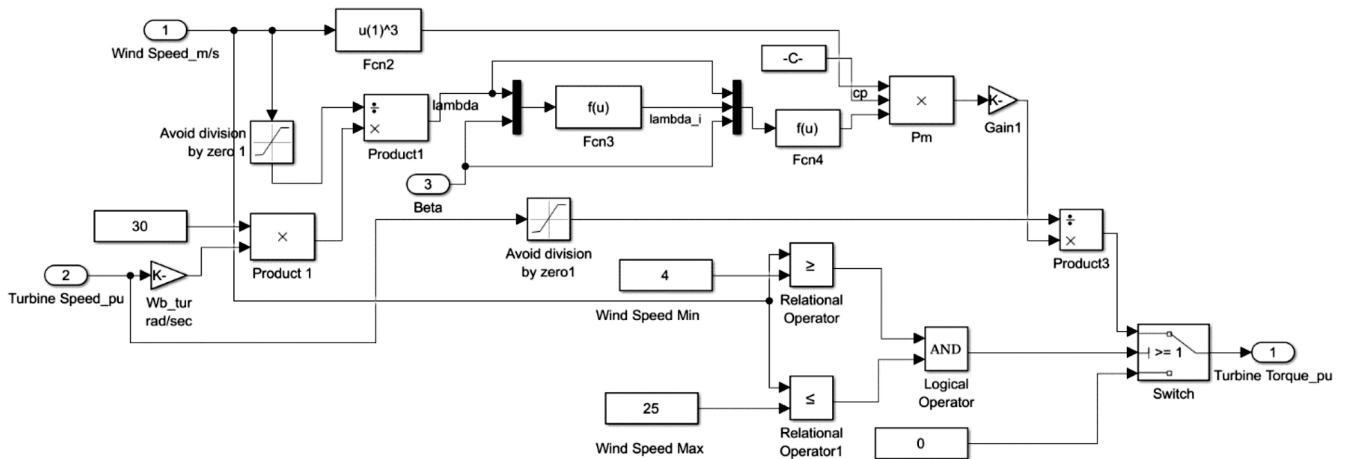


Рис. 3. Модель ветроколеса ВЭУ в MATLAB Simulink

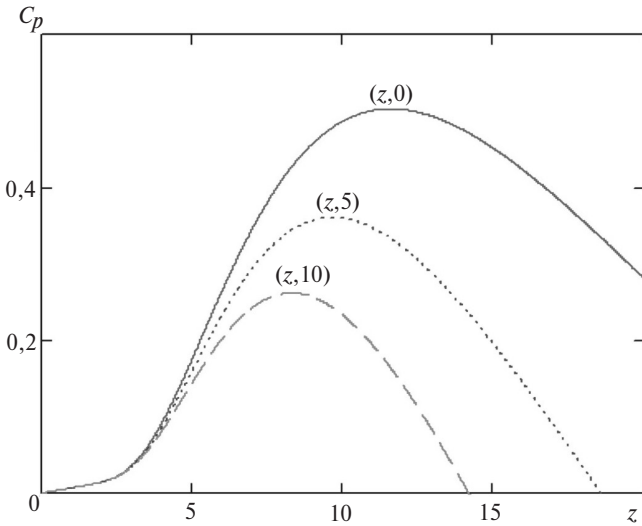


Рис. 4. Аэродинамическая характеристика ветроколеса

Графическая функция  $C_p(z, \beta)$  показана на рис. 4.

Модель аэродинамического регулирования реализует управление углом поворота лопасти для достижения номинального значения выработки при увеличении скорости ветра больше номинальной. Входными характеристиками являются ток  $I$  и напряжение  $U$  на генераторной шине, выходной характеристикой является угол поворота лопасти  $\beta$ .

Аэродинамическое регулирование угла поворота лопасти реализуется последовательностью следующих этапов в элементах библиотеки Simscape Power Systems™ [8]:

расчет значений активной и реактивной мощности по значениям тока и напряжения ВЭУ;

определение среднего значения активной мощности;

сравнение значения активной мощности с номинальным значением, превышение которого подаёт сигнал для изменения угла поворота лопасти;

при превышении номинального значения изменение угла поворота лопасти посредством пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регуля-

тор), который использует ограничение выходной электрической мощности для преобразования ее в угол поворота лопасти при ее превышении номинального значения мощности.

Модель аэродинамического регулирования в MATLAB показана на рис. 5.

Модель механической части ВЭУ рассматривается как модель двухмассовой системы, состоящей из массы ветроколеса и массы электрогенератора. В этой модели масса ветроколеса вращается на низкоскоростном валу, а масса генератора вращается на высокоскоростном валу, которые соединяются в редукторе и редуктор моделируется как пружина и демпфер [9]. Пружина представляет собой низкую жесткость вала ветроколеса-генератора, наличие редуктора также считается одним из основных источников гибкости вала. Двумассовая механическая модель ВЭУ представлена на рис. 6.

Математические уравнения движения системы ветроколеса-генератора можно представить следующими выражениями [10]:

$$2J_{\text{ВК}} \frac{d\omega_{\text{ВК}}}{dt} = M_{\text{ВК}} - M_{\text{М}}; \tag{3}$$

$$2J_{\text{ГЕН}} \frac{d\omega_{\text{ГЕН}}}{dt} = M_{\text{М}} - M_{\text{Э}}; \tag{4}$$

$$\frac{1}{\omega_{\text{Н}}} \frac{d\theta}{dt} = \omega_{\text{ВК}} - \omega_{\text{ГЕН}}; \tag{5}$$

$$M_{\text{М}} = K_{\text{T}}\theta + D_{\text{В}} \frac{d\theta}{dt}, \tag{6}$$

где  $M_{\text{М}}$  – механический момент на валу ветроколеса-генератора ВЭУ, отн.ед.;  $M_{\text{ВК}}$  – механический момент на валу ветроколеса, отн. ед;  $M_{\text{Э}}$  – электромагнитный момент на валу генератора, отн. ед.;  $J_{\text{ВК}}$  и  $J_{\text{ГЕН}}$  – постоянные инерции ротора ВК и ротора генератора соответственно, с;  $\omega_{\text{ВК}}$  и  $\omega_{\text{ГЕН}}$  – угловая скорость вращения ротора ВЭУ и ротора генератора соответственно, отн.ед.;  $\omega_{\text{Н}}$  – номинальная угловая скорость вращения генератора, рад/с;  $\theta$  – угол поворота ротора ветроколеса отно-

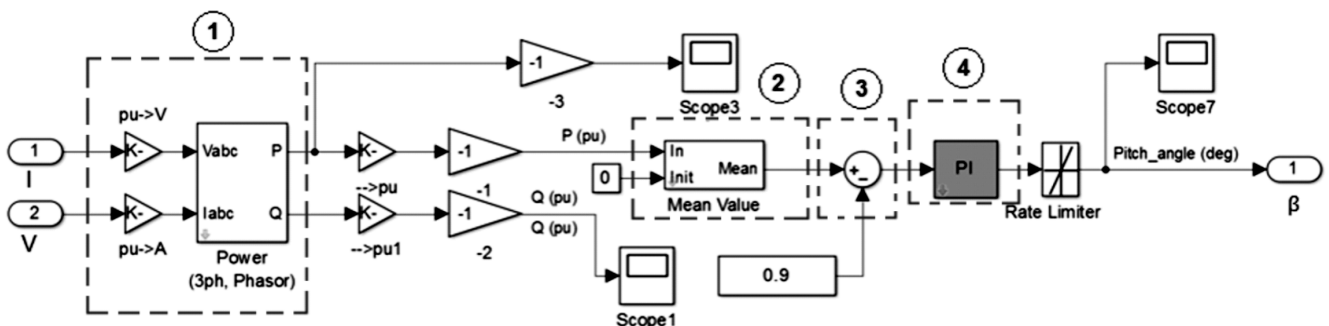


Рис. 5. Модель аэродинамического регулирования в MATLAB Simulink

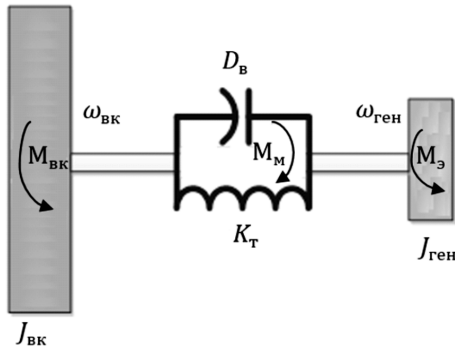


Рис. 6. Двумассовая механическая модель ВЭУ

сительно ротора генератора, рад;  $K_T$  – торсионная жесткость вала ветроколеса-генератора, отн. ед./рад;  $D_B$  – демпфирующее значение взаимного влияния динамических сил, возникающих из-за разной чистоты вращения вала генератора и вала ветроколеса, (отн.ед.) · с/рад.

На рис. 7,а показана модель механической части ВЭУ в MATLAB Simulink.

Модель электрической части ВЭУ (рис. 7,б) состоит из асинхронного генератора (АГ), соединённого через шины генераторного напряжения с трансформатором, конденсатора для пуска генератора и электрической сети большой мощности.

Генератор имеет входной параметр – механический момент на роторе генератора  $M_M$ , определённый из модели механической части ВЭУ, и выходные параметры – значения тока  $I_{abc}$  и напряжения  $U_{abc}$  для расчета значений активной и реактивной мощности, частота вращения генератора,

использованная в модели механической части ВЭУ.

На рис.7,б показана модель электрической части сетевой ВЭУ с асинхронным генератором с ротором «беличья клетка» мощностью 1,3 МВт и напряжением 690 В.

Асинхронный генератор, сеть, трансформатор и блок аккумуляторных батарей реализованы готовыми блоками библиотеки Simscape Power Systems™.

Трансформатор повышает генераторное напряжение 690 В до значений сетевого напряжения 20 кВ, с шины генераторного напряжения снимаются значения тока и напряжения, которые поступают в модели аэродинамического регулирования для определения значений активной и реактивной мощности. На выходе к генератору подключается конденсатор (аккумуляторная батарея) мощностью 400 квар, необходимой для пуска и регулирования асинхронного генератора.

Общая модель сетевой ВЭУ SWT 1.3 МВт с асинхронным генератором в среде MATLAB Simulink показана на рис. 8.

Моделирование режимов работы сетевой ВЭУ SWT 1.3 МВт. При моделировании рассмотрены следующие режимы работы.

Пуск ВЭУ. Для пуска асинхронного генератора в начальный момент времени требуется реактивная мощность, вырабатываемая системами компенсации реактивной мощности (в данном случае конденсаторными батареями). При пуске асинхронного генератора мощностью 1,3 МВт требуется реактивная мощность около 300 квар. В дальнейшем

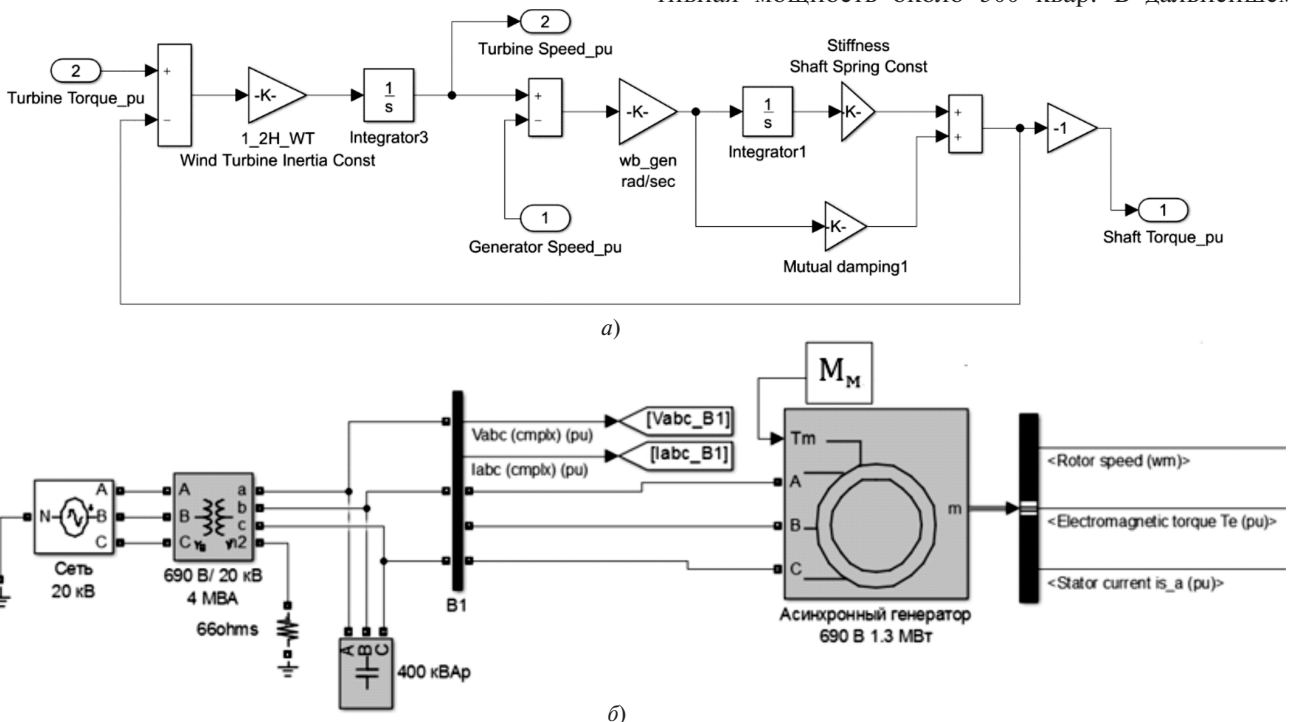


Рис. 7. Модель механической (а) и электрической (б) части ВЭУ (MATLAB Simulink)



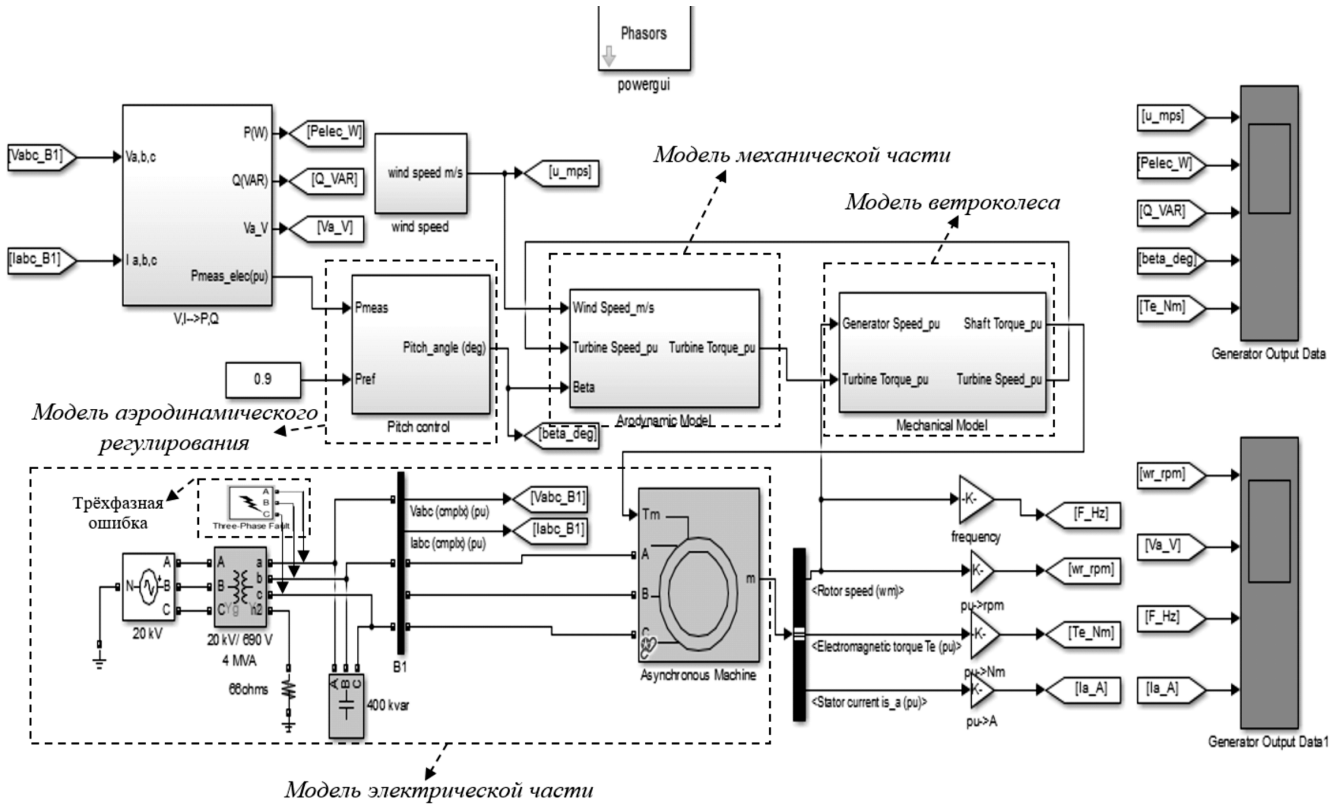


Рис. 8. Общая модель сетевой ВЭУ SWT 1.3 МВт в среде MATLAB Simulink

при линейном увеличении механического момента на роторе генератора наблюдается линейное возрастание активной мощности и нелинейное увеличение реактивной мощности. На рис. 9 показаны

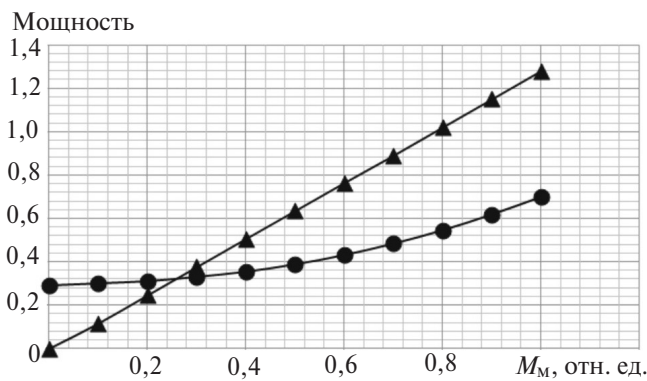


Рис. 9. Мощности АГ при линейном увеличении механического момента  $M_m$ :  $\blacktriangle$  –  $P$ ;  $\bullet$  –  $Q$

мощности АГ при линейном увеличении механического момента.

Кроме того, электрическое регулирование выходного напряжения на шинах генератора также регулируется за счет реактивной мощности, вырабатываемой конденсаторными батареями. Применение конденсаторных батарей относится к недостаткам схем ВЭУ с применением асинхронных генераторов.

Скорость ветра, м/с

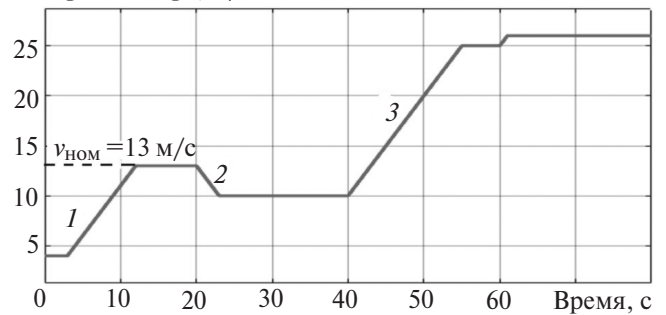


Рис. 10. График изменения скорости ветра

*Рабочие режимы ВЭУ.* Так как ВЭУ работает на случайном приходе ветрового ресурса, рассмотрены несколько рабочих режимов ВЭУ (1–3, рис. 10). Для каждого из режимов получены показатели, приведенные в таблице.

Изменение активной и реактивной мощности показано на рис. 11.

При увеличении или уменьшении скорости ветра ниже номинального значения изменение мощности происходит согласно степенному закону изменения скорости ветра – формула (1). При номинальной скорости ветра  $v = 13$  м/с мощность достигает номинального значения  $P_{НОМ} = 1,3$  МВт. При резком превышении скорости ветра выше номинального значения, например при порывах, происходит резкое увеличение мощности сверх номи-

Время $t$ , с	Параметры ВЭУ								
	$v$ , м/с	$P$ , Вт	$Q$ , вар	$\beta$ , град	$M_g$ , Н·м	$I_a$ , А	$U_a$ , В	$f$ , Гц	$n$ , об/мин
3	4	547	$-0,3 \cdot 10^6$	0	0,5	246	398,7	50	1500
12	13	$1,27 \cdot 10^6$	$-0,7 \cdot 10^6$	0	8294	1087	397,1	50,28	1508
23	10	$7,41 \cdot 10^5$	$0,45 \cdot 10^6$	0	4733	636	398,3	50,14	1504
43	13	$1,27 \cdot 10^6$	$-0,7 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^{-13}$	8294	1087	397,1	50,28	1508
47	17	$1,6 \cdot 10^6$	$-0,9 \cdot 10^6$	6,53	10300	1395	396	50,37	1511
55	25	$1,27 \cdot 10^6$	$-0,7 \cdot 10^6$	37	8294	1087	397,1	50,28	1508
63	26	0	$-0,3 \cdot 10^6$	0	0	246	398,7	0	0

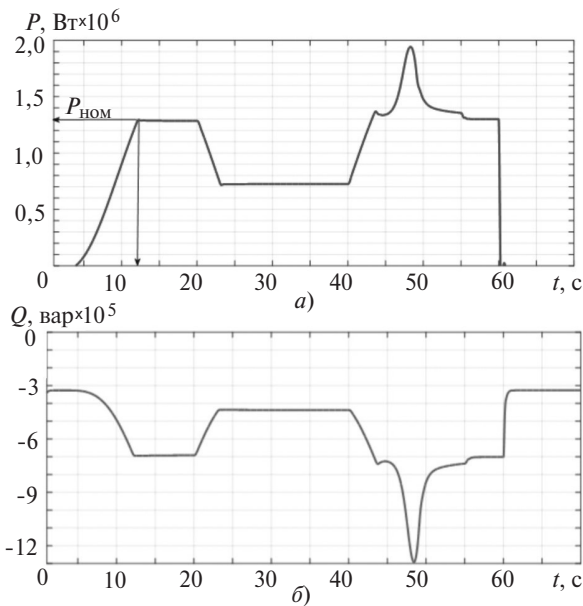


Рис. 11. График активной (а) и реактивной (б) мощности

нального значения. Однако за счет включения системы управления поворотом лопастей происходит регулирование угла атаки.

На рис. 12 показано регулирование на временном отрезке с 43-й по 55 с в диапазоне от 0 до 37°. На рис. 11,а на данном участке виден переходной процесс изменения мощностей, вызванный инерционностью систем регулирования поворота лопастей. При стабильной работе ВЭУ при скорости

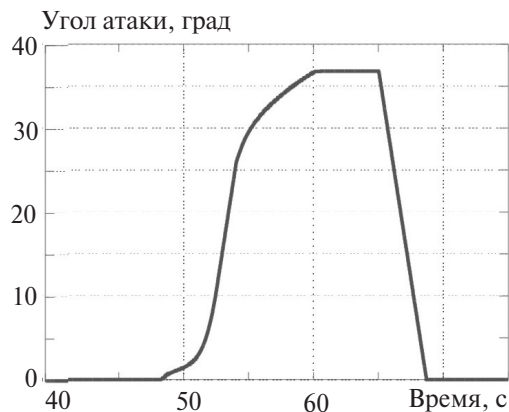


Рис. 12. Регулирование угла атаки ВЭУ

25 м/с происходит выработка номинального значения мощности за счет регулирования срыва потока на лопастях. При значении скорости ветра более 25 м/с происходит остановка ВЭУ, в течение которой активная мощность постепенно падает до нуля. Для реактивной мощности характерен похожий график потребления мощности из сети, поэтому на рис. 11,б реактивная мощность имеет отрицательные значения. Модуль значения реактивной мощности в любой момент времени показан на рис. 9.

На рис. 13 показаны изменения показателей качества электрической энергии: действующее значение фазного напряжения статора и частоты сети. Согласно [11] предельное значение колебаний в сетях малого и среднего уровней напряжения и частоты составляет 10%. Согласно рис. 13 максимальное отклонение напряжения составляет 1,5%, частоты – 1%. Невысокие значения отклонения колебаний вызваны наличием сети 20 кВ, а также конденсаторными батареями, которые поддерживают перетоки реактивной мощности в системе, и, соот-



Рис. 13. Колебание действующего значения напряжения (а) и частоты (б) на шинах генератора

ветственно, происходит регулирование напряжения на шинах генератора.

**Режим короткого замыкания.** Этот режим определяется включением на шины генератора элемента «Трёхфазная ошибка» (см. рис. 8).

При коротком замыкании (КЗ) на шинах генераторного напряжения значение тока значительно увеличивается. Рассмотрены основные виды КЗ: однофазное, двухфазное и трёхфазное. Результаты расчета режима короткого замыкания:

Режим	Значение тока генератора $I_{кз}$ , А
Номинальный	1088
КЗ на землю однофазное	1088
двухфазное	6600
трёхфазное	7000

Из анализа приведенных данных видно, что режим трёхфазного КЗ наиболее тяжелый для оборудования ВЭУ, поэтому дальнейший выбор оборудования должен проходить с учетом семикратного увеличения номинального значения тока. При однофазном замыкании ток не увеличивается, так как выдача мощности от ВЭУ осуществляется по двум фазам с увеличением уровня напряжения до 690 В, т.е. режим однофазного КЗ для ВЭУ является устойчивым.

**Остановка ВЭУ.** При увеличении скорости ветра выше предельной (25 м/с, при  $t > 60$  с; см. рис. 10), происходит остановка ВЭУ и в результате – резкое падение вырабатываемой мощности (см. рис. 11,а). Переходной процесс отключения ВЭУ длится меньше секунды, что говорит о высокой манёвренности оборудования. Угол атаки лопасти возвращается в исходное положение, соответствующее минимальной скорости ветра. Быстродействие системы происходит в течение 4 с, что свидетельствует о высокой инерционности системы. Показатели качества энергии не выходят за рамки предельных значений, это объясняется тем, что регулирование на шинах ВЭУ обеспечивается за счет энергосистемы.

**Выводы.** 1. При пуске асинхронного генератора мощностью 1,3 МВт требуется реактивная мощность около 300 квар.

2. При линейном увеличении механического момента на роторе генератора наблюдается линейное возрастание активной мощности и нелинейное увеличение реактивной мощности.

3. При резком превышении скорости ветра (больше номинального значения) происходит резкое увеличение мощности (более 1,3 МВт). Однако за счет включения системы управления поворотом

лопастей происходит регулирование угла атаки в диапазоне от 0 до 37°.

4. Показатели качества электроэнергии при работе ВЭУ на сеть достаточно большой мощности находятся в допустимых по ГОСТ пределах: максимальное отклонение напряжения 1,5%, частоты – 1%.

5. При КЗ на шинах генераторного напряжения наиболее тяжелым случаем является режим трёхфазного КЗ на землю, при котором ток КЗ равен примерно 7000 А, что в 7 раз больше номинального значения. При однофазном замыкании ток практически не увеличивается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. Изд. 3-е, доп. – СПб.: Изд. Полит. ун-та, 2016, 424 с.
2. Елистратов В.В. Работа ветроэлектростанций в энергосистеме и мифы об их негативном влиянии. – Электричество, 2014, № 7, с. 41–48.
3. Housque D. Introduction to MATLAB for engineering students. – Northwestern University, 2005, p. 74.
4. Рамадан А., Денисов Р.С. Моделирование режимов работы ВЭУ с асинхронным генератором в MATLAB Simulink. – Материалы научного форума с международным участием. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015, с. 222–224.
5. [http://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_24\\_siemens\\_sw-1.3-62.php](http://www.thewindpower.net/turbine_en_24_siemens_sw-1.3-62.php)
6. Djamilia Rekioua. Wind Power Electric Systems: Modeling, Simulation and Control, Springer, 2013, p. 202.
7. Heier S. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons Ltd, 1998, p. 385.
8. Panos M. Pardalos, Steffen Rebennack, Mario V. F. Pereira, Niko A. Iliadis. Handbook of Wind Power Systems, Springer, 2013, p. 839.
9. Abram Perdana, Dynamic Models of Wind Turbines. – PhD dissertation, Chalmers university of technology (Sweden), 2008.
10. D. Mary, Shinosh Mathew, Sreejith K. Modal Analysis of Grid-Connected Doubly Fed Induction Generators. – IEEE transactions on energy conversion, September 2007, vol. 22, No. 3.
11. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

[24.08.2017]

*Авторы: Рамадан Амер окончил электромеханический факультет университета Дамаска (Сирийская Арабская Республика) в 2009 г. В 2016 г. окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбГПУ). Аспирант СПбГПУ.*

*Елистратов Виктор Васильевич окончил гидротехнический факультет Ленинградского политехнического института в 1977г. В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Основы и методы гидравлического аккумулирования энергии возобновляемых источников» СПбГПУ.*

## Computer Design of the Network Wind-Driven Powerplant

**RAMADAN Amer** (St. Petersburg Politechnical University, St. Petersburg, Russia) – Ph.D. Student

**YELISTRATOV Viktor V.** (St. Petersburg Politechnical University, St. Petersburg, Russia) – Director of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

The mathematical models of windmill elements are developed and the software for simulating the misselected to address the problems concerned with ensuring high quality of electric power and safe operation of windmills in terms of energy security. It is shown that the MATLAB Simulink compute program, which is successfully used for constructing the models of various electric power systems, including wind mills, is a software package best suited for solving the above-mentioned problems. The article presents the results obtained from simulating a network windmill equipped with an asynchronous generator in the MATLAB Simulink environment aimed at studying the operating modes and adjusting the operation of the windmill's power-generating equipment. Four mathematical models of windmill elements, namely, a windwheel, an aerodynamic control system, mechanical part, and electrical part (the latter includes the generator, transformer, capacitor, and large-capacity electric network) are developed. The windmill operating modes were studied as applied to the Type SWT 1.3-MW windmill produced by Siemens. The list of considered modes included startup, working modes of operation, short-circuit conditions, and shutdown mode.

**Key words:** windmill, asynchronous generator, electric power quality, electromechanical equipment model, operating modes, simulation in the MATLAB Simulink environment

### REFERENCES

1. **Yelistratov V.V.** *Vozobnovlyayemaya energetika. Izd. 3-ye, dop.* (Renewable energy. Publ. 3 rd). St. Petersburg Polytechnical University, 2016, 424 p.
2. **Yelistratov V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 7, pp. 41–48.
3. **Houcque D.** Introduction to MATLAB for engineering students. – Northwestern University, 2005, p.74.
4. **Ramadan A., Denisov R.S.** *Materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiyem – in Russ. (Materials of scientific forum with international participation)*. St. Petersburg, Publ. St. Petersburg Politechnical University, 2015, pp. 222–224.
5. [http://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_24\\_siemens\\_swt-1.3-62.php](http://www.thewindpower.net/turbine_en_24_siemens_swt-1.3-62.php)
6. **Djamila Rekioua.** Wind Power Electric Systems: Modeling, Simulation and Control, Springer, 2013, p.202.
7. **Heier S.** Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons Ltd, 1998, p. 385.
8. **Panos M. Pardalos, Steffen Rebennack, Mario V. F. Pereira, Niko A. Iliadis.** Handbook of Wind Power Systems, Springer, 2013, p. 839.
9. **Abram Perdana,** Dynamic Models of Wind Turbines. – PhD dissertation, Chalmers university of technology (Sweden), 2008.
10. **D. Mary, Shinosh Mathew, Sreejith K.** Modal Analysis of Grid-Connected Doubly Fed Induction Generators. – IEEE transactions on energy conversion, September 2007, vol. 22, No. 3.
11. **GOST 32144–2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektroobrazovaniya obshchego naznacheniya* (Electric energy. Hardware compability is electromagnetic...).

[24.08.2017]