

УДК 621.313

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МОДУЛЯ МУЛЬТИМОДУЛЬНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Соломенкова О. Б.

*ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»,  
Саратов, Россия (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77) Lely-12352@yandex.ru*

Представлена новая конструкция ветроэлектростанции – мультимодульная ветроэлектростанция с составным перестраиваемым ветроколесом, обладающая повышенной эффективностью при работе в расширенном диапазоне ветровых нагрузок. Составное перестраиваемое ветроколесо работает с изменяемым числом рабочих лопастей в трех режимах, в зависимости от скорости ветра, при высоком значении коэффициента использования энергии ветра  $\xi = 0,35 - 0,47$  и пусковом моменте в 4 раза больше, чем у типовых 3-х лопастных ветроэлектростанций (при скорости ветра 2,5 м/с). Модульный принцип построения ветроэлектростанции позволяет обеспечить гарантированное энергоснабжение объекта, при этом осуществлять сервисное обслуживание, не прерывая подачу электроэнергии, а также не требует больших финансовых и трудовых затрат на проектные, строительные и монтажные работы, за счет высокой степени заводской готовности поставляемого оборудования, легкости его монтажа и запуска в работу. При этом отсутствует необходимость избыточного резервирования устанавливаемых мощностей. Для стабилизации выходного напряжения, при изменяющейся в широких пределах величины генераторного напряжения, применен преобразователь частоты на основе инвертора тока с индуктивно-тиристорным компенсатором реактивной мощности. Создана имитационная модель электротехнического комплекса модуля мультимодульной ветроэлектростанции с помощью программного обеспечения Matlab Simulink.

Ключевые слова: ветроколесо, ветроэлектростанция, инвертор тока, математическая модель.

## MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX ELECTRICAL MODULE MULTIPACKAGE WIND-DRIVEN ELECTRIC STATION

Solomenkova O. B.

*FGBOU Saratov State Technical University n.a. Gagarin JA,  
Saratov, Russia (410054, Saratov, street Politekhnikeskaya, 77) Lely-12352@yandex.ru*

Presented by the new wind farm design solution – multipackage wind – driven electric station with a tunable composite wind wheel, which has increased efficiency while working in an extended range of wind loads. Composite tunable wind wheel works with variable number of working blades in three modes, depending on the wind speed at a high utilization of wind energy  $\xi = 0,35 - 0,47$  and torque to 4 times more than the typical 3-bladed wind power (at wind speed 2.5 m/s). The modular design allows the wind farm to be sure that power supply facility, at the same time to carry out maintenance without interrupting the flow of electricity and do not require large financial and labor costs for design, construction and installation work due to the high degree of prefabrication of the supplied equipment, its ease of installation and start the work. In this case there is no need for redundancy installed capacity. To stabilize the output voltage when changing the value in a wide range of generator voltage, applied frequency converter based on the current inverter with inductive-reactive power compensator thyristor. Created a simulation model of the complex electrical module multipackage wind – driven electric station with the software Matlab Simulink.

Key words: wind wheel, wind – driven electric station, the inverter current, the mathematical model.

Использование нетрадиционных источников энергии становится глобальной тенденцией в связи с постоянным ростом цен на традиционные энергоносители (нефть, газ, уголь и т.д.), их ограниченным запасом и неисчерпаемым потенциалом альтернативной энергии (солнце, ветер, прилив и т.д.) [5]. Первое место среди электростанций на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии занимают ветроэлектрические установки. И это связано с практически повсеместной распространенностью энергии

воздушного потока, его большим потенциалом и значительными успехами, достигнутыми в мировой ветроэнергетике за последние годы [3].

Целью исследования является увеличение вырабатываемой электрической энергии в расширенном диапазоне ветровых нагрузок, повышение эффективности использования энергии ветра путем создания новой конструкции ветроэлектростанции (ВЭС) – мультимодульной ВЭС с составным перестраиваемым ветроколесом (СПВК).

Методы исследования включают аналитические методы, которые базируются на современной теории работы ветроэнергетических установок, теории электрических машин, преобразователей частоты, магнитоэлектрических систем, а также современном аппарате математического и имитационного компьютерного моделирования.

Мультимодульная ветроэлектростанция – это ветроэлектростанция, представляющая собой систему однотипных транспортабельных модулей небольшой мощности, конструктивно и функционально совместимых между собой, которыми управляет единая система управления. Модульный принцип построения ВЭС позволяет путем увеличения количества модулей получить любую необходимую мощность, а также повысить надежность и ремонтпригодность при транспортировке, монтаже и эксплуатации [2].

Основными составляющими модуля рассматриваемой ветроэлектростанции являются: СПВК, магнитоэлектрическая система перемещения ветроколес для изменения числа рабочих лопастей, электрический генератор, преобразователь частоты на основе инвертора тока, накопитель электрической энергии в виде аккумуляторной батареи с зарядным устройством, а также микропроцессорный блок управления с набором датчиков тока, напряжения, скорости и направления ветрового потока (рис. 1).

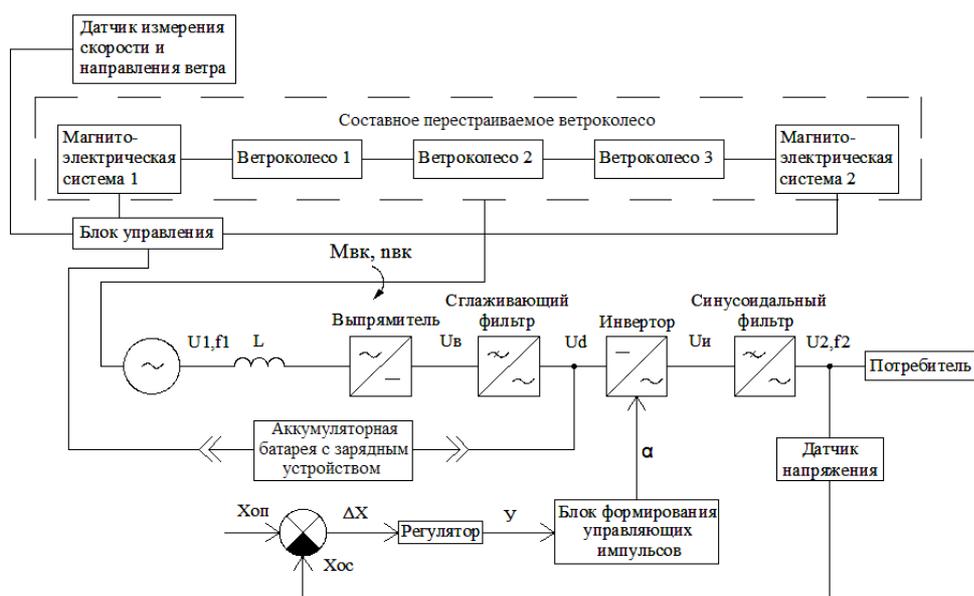


Рис. 1. Схема модуля мультимодульной ветроэлектростанции

СПВК состоит из трех ветроколес (ВК) и магнитоэлектрической системы перемещения ВК для включения в работу разного количества рабочих лопастей 12, 6, 3. Данное решение позволяет обеспечить возможность ВЭС работать в широком диапазоне изменения скоростей ветра при высоком значении коэффициента использования энергии ветра  $\xi = 0,35-0,47$  и большом пусковом моменте (для преодоления сил трения) при скорости ветра 2,5 м/с.

На рис. 2 представлены графики изменения коэффициента использования энергии ветра  $\xi$  и вращающего момента  $\bar{M}$ , в зависимости от быстроходности  $Z$  для 3-х, 6-и и 12-и лопастных ветроколес, сплошной линией изображен график разработанного СПВК.

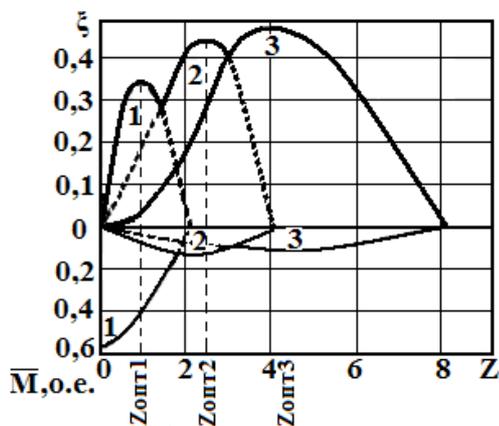


Рис. 2. Графики коэффициента использования энергии ветра и вращающего момента СПВК

1–12-и лопастное ВК, 2–6-и лопастное ВК, 3–3-х лопастное ВК;  $Z_{опт1}$  – оптимальная быстроходность 12-и лопастного ВК,  $Z_{опт2}$  – оптимальная быстроходность 6-и лопастного ВК,  $Z_{опт3}$  – оптимальная быстроходность 3-х лопастного ВК.

Из графиков видно, что СПВК позволяет иметь оптимальную быстроходность  $Z$  в пределах от 1 до 3, с максимальным коэффициентом использования энергии ветра и большими пусковыми моментами в зоне малых скоростей ветра.

В зависимости от скорости ветра СПВК работает в следующих режимах. При низкой скорости ветра от 2,5 до 4 м/с, лопасти всех ветроколес (общее количество лопастей – 12), совмещены в одной плоскости и участвуют в работе СПВК, обеспечивая максимальный вращающий момент при высоком коэффициенте использования энергии ветра (рис. 2, а). При средней скорости ветра от 4 до 6,5 м/с ВК, содержащее шесть лопастей, отсоединяется от основного ВК, смещается вправо и перестает вращаться (рис. 2, б). В работе остаются два ВК с общим количеством лопастей 6. При скорости ветра от 6,5 до 15 м/с ВК, содержащее три лопасти, отсоединяется от основного ВК, смещается влево и перестает вращаться (рис. 2, в). При этом в работе остается одно 3-х лопастное ВК, которое продолжает работать с максимальной скоростью вращения, а остановившиеся ВК не препятствуют вращению основного ВК, а являются направляющим для ветрового потока [4].

Основное дифференциальное уравнение, описывающее динамику вращения СПВК, представлено в виде:

$$J_{\text{спвк}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{спвк}} - M_e - M_c, \quad (1)$$

где  $J_{\text{спвк}}$  – момент инерции системы ветроколесо – генератор;

$\omega$  – угловая частота вращения вала, рад/с;

$M_{\text{спвк}}$  – механический момент вращения СПВК при оптимальной быстроходности,

Н·м;

$M_e$  – электромагнитный момент ротора генератора, Н·м;

$M_c$  – максимальный вращающий момент ветроколеса, Н·м.

Мощность СПВК определяется из выражения:

$$P_{\text{спвк}} = \frac{E}{T} = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 \left[ F_1 \left( \int_{2,5}^4 v_1^3 C_{p1} h_v \right) + F_2 \left( \int_4^7 v_2^3 C_{p2} h_v \right) + F_3 \left( \int_7^{15} v_3^3 C_{p3} h_v \right) \right] dv, \quad (2)$$

где  $C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}$  – коэффициенты использования энергии ветра при работе 12-и лопастей СПВК при скорости ветра  $v_1 = 2,5 - 4$  м/с; 6-и лопастей СПВК при м/с; 3-х лопастей СПВК при  $v_3 = 7 - 15$  м/с, соответственно;

$F_1 = 1$ , при  $2,5 < v \leq 4$ ,  $F_1 = 0$ , при  $0 < v < 2,5$ ,  $v > 4$ ;  $F_2 = 1$ , при  $4 < v \leq 7$ ,  $F_2 = 0$ , при  $2,5 < v < 4$ ,  $v > 7$ ;  $F_3 = 1$ , при  $7 < v \leq 15$ ,  $F_3 = 0$ , при  $0 < v < 7$ .

$h_v$  – функция распределения скоростей ветра по Вейбуллу:

$$h_v = 0,000004x^5 - 0,0002x^4 + 0,0044x^3 - 0,0406x^2 + 0,1439x - 0,0022. \quad (3)$$

Исследования режимов работы мультимодульной ВЭС показали, что при скорости ветра 2,5 м/с, величина генераторного напряжения составляет 10 % от требуемой величины выходного напряжения 380 В. Мощность ветрового потока при этом составляет 1 % от номинальной мощности модуля. Проблема получения необходимого по величине и частоте выходного напряжения была решена за счет применения преобразователя частоты на основе инвертора тока (ИТ). Инвертор тока в наибольшей степени подходит по своим свойствам к режиму работы ВЭС, за счет свойственной ему внешней характеристики.

Применение преобразователя частоты на основе ИТ позволяет иметь выходное напряжение необходимой величины и качества при изменении генераторного напряжения в широких пределах. Основной особенностью ИТ является возможность получения выходного напряжения, значительно превышающего входное [1].

Однако внешняя характеристика ИТ имеет круто падающий характер. Для получения стабильного выходного напряжения, при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной, необходимо схему дополнить компенсирующим устройством – индуктивно-тиристорным компенсатором выпрямительного типа. На рис. 3 представлена схема преобразователя частоты на основе инвертора тока с компенсатором реактивной мощности.

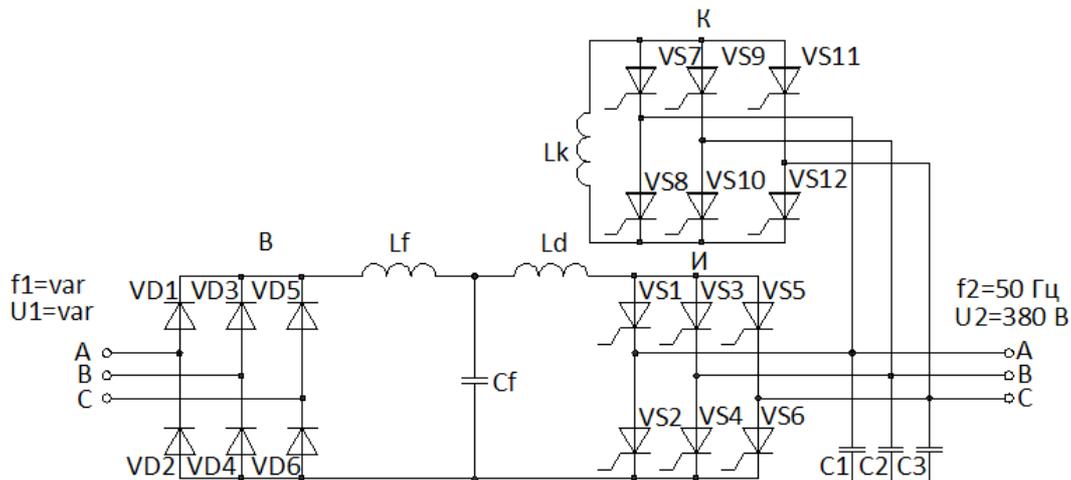


Рис. 3. Схема преобразователя частоты на основе инвертора тока с индуктивно-тиристорным компенсатором реактивной мощности  
 VD1-VD6 – диоды выпрямителя; VS1-VS6 – тиристоры инвертора тока;  
 VS7-VS12 – тиристоры компенсатора; Lk – входной дроссель компенсатора;  
 Lf, Cf – сглаживающие фильтры; Ld – входной дроссель инвертора тока;  
 C1-C3 – коммутирующие конденсаторы.

На рис. 4 представлены внешние характеристики ИТ, при совместной работе с компенсирующим устройством и без компенсирующего устройства. Из графиков видно, что при работе ИТ, совместно с компенсатором, имеем участки строго постоянного выходного напряжения при изменении нагрузки в определенных пределах. Данные характеристики хорошо согласуются с особенностями работы ВЭС при ветровых нагрузках, от очень слабых до максимальных.

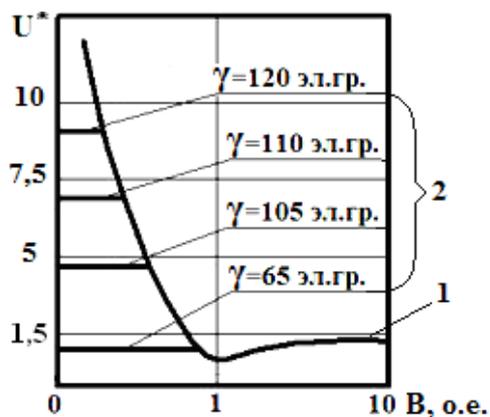


Рис. 4. Внешние характеристики инвертора тока  
 $\gamma$  – угол управления компенсатором;  
 1 – без учета работы компенсатора реактивной мощности; 2 – с учетом работы компенсатора реактивной мощности.

Внешняя характеристика ИТ в относительных величинах (в рамках метода основной гармоники) выражается в виде зависимости:

$$U^* = \frac{U}{U_d} = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{B \cdot \cos \beta} - \operatorname{tg} \varphi\right)^2 + 1}, \quad (4)$$

$U^*$  – отношение величины выходного напряжения  $U$  к напряжению питания  $U_d$ ;

$B$  – коэффициент загрузки;

$\beta$  – угол запираия;

$\varphi$  – фазовый угол нагрузки.

Коэффициент загрузки определяется из выражения:

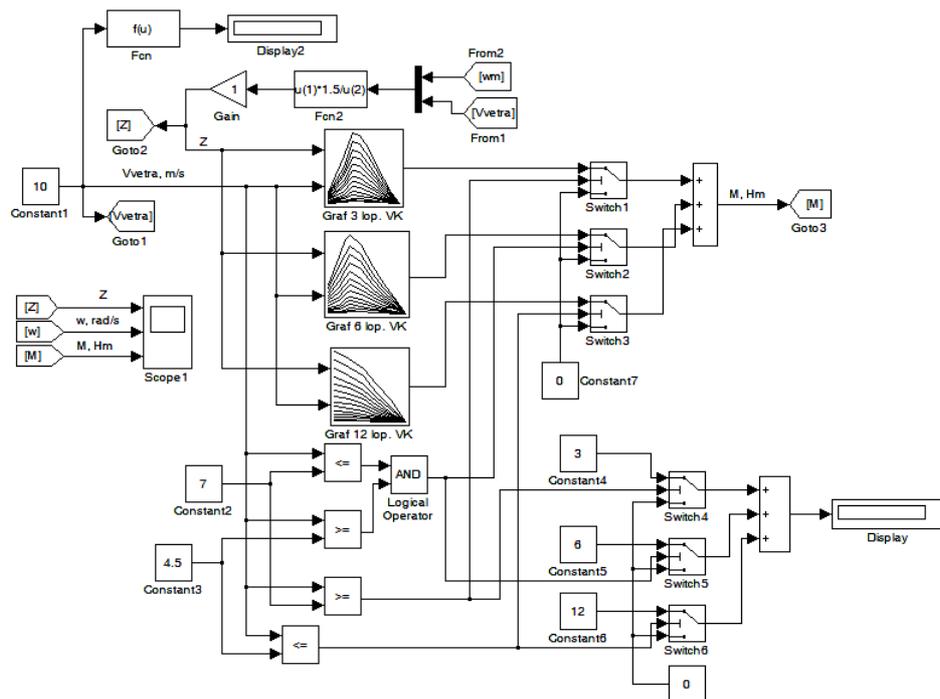
$$B = \frac{1}{\omega \cdot z \cdot C}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – выходная частота, рад/с;

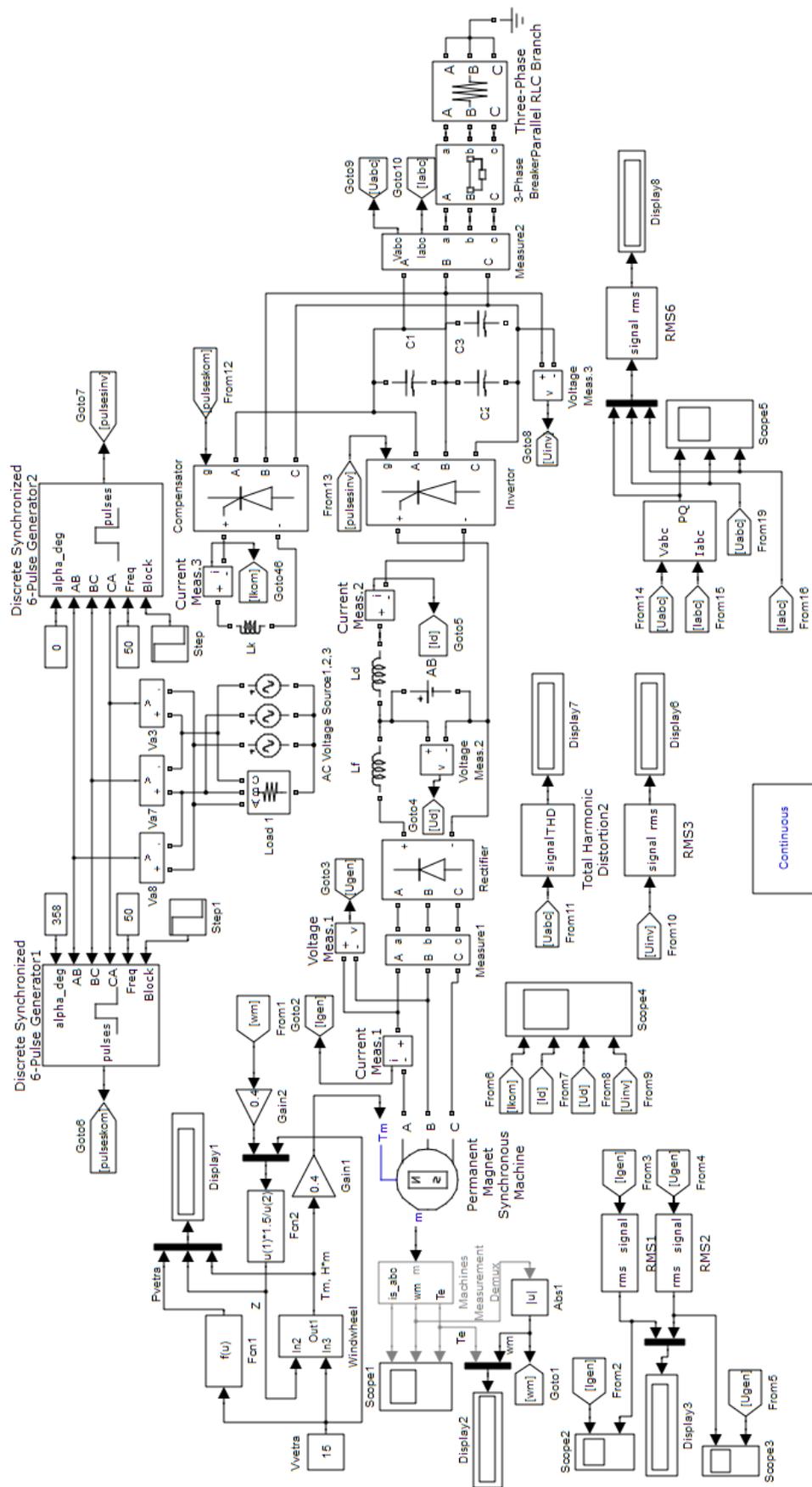
$z$  – сопротивление нагрузки, Ом;

$C$  – фазная емкость коммутирующей батареи, Ф.

Актуальной задачей сегодня является создание математических моделей различных объектов используемых для эффективного анализа физических явлений, предсказывающих поведение исследуемой системы без создания дорогостоящих прототипов [6]. Поэтому и для мультимодульной ВЭС с СПВК была создана математическая модель с помощью программного обеспечения MATLAB Simulink (рис. 5 а, б).



a)



б)

Рис. 5. Имитационная математическая модель: а – СПВК (блок Windwheel);

б – мультимодульной ВЭС с СПВК

Исследования на математической модели показали, что применение преобразователя на основе ИТ, для работы при частоте 50 Гц, позволяет получить кривую выходного напряжения, по форме близкую к синусоидальной, и обеспечить наличие стабильного по величине напряжения на нагрузке во всем диапазоне изменения мощности ветрового потока.

Применение мультимодульной ВЭС с СПВК позволяет увеличить годовую выработку электроэнергии на 22 %, при этом 14 % – за счет установки СПВК, 8 % – за счет работы мультимодульной ВЭС в расширенном диапазоне скоростей ветра.

#### Список литературы

1. Артюхов И. И., Митяшин Н. П., Серветник В. А. Автономные инверторы тока в системах электропитания. Саратов: Сарат. полтехн. ин-т, 1992. 152 с.
2. Ветроэлектростанция: пат. 2062353 Рос. Федерация. № 93025791/06; заявл. 28.04.1993; опубл. 20.06.1996. 5 с.
3. Кривцов В. С., Олейников А. М., Яковлев А. И. Неисчерпаемая энергия Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы: учебник. Харьков: ХАИ, 2003. 400 с.
4. Мультимодульная ветроэлектростанция для районов Заволжья Саратовской области / О. Б. Соломенкова [и др.] // Вестник СГТУ. Саратов, 2011. №1 (54). Вып. 3. С. 181-186.
5. Никитенко Г. В., Коноплев Е. В. Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография. Ставрополь: АГРУС, 2008. 152 с.
6. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер, 2008. 288 с.

#### Рецензенты:

Артюхов Иван Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» СГТУ имени Гагарина Ю. А., г. Саратов.  
Томашевский Юрий Болеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системотехника» СГТУ имени Гагарина Ю. А., г. Саратов.