

УДК 621.311.24.01

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

канд. техн. наук, доц. Петренко Ю. Н., Асп. Санкевич С. А.

Белорусский национальный технический университет

За последнее десятилетие ветроэлектрические установки (ВЭУ) демонстрируют быстрый рост генерируемой электроэнергии и наибольший среди возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В конце 2012 г. суммарная мощность ВЭУ увеличилась до 282,43 МВт по сравнению с 23,9 МВт в 2002г [1]. До недавнего времени, основной электрической машиной для ВЭУ был асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором (АГКЗ). В последние годы все чаще применяются установки с переменной скоростью вращения ветровой турбины, что позволяет увеличить эффективность ВЭУ. Это, в свою очередь, формирует спектр вопросов связанных с управлением такими установками. В ВЭУ существенную роль играют силовые электронные преобразовательные устройства (СЭПУ), являясь составной частью системы с переменной скоростью вращения для достижения высоких энергетических показателей. Даже в системе турбина – генератор с постоянной скоростью вращения, где ВЭУ подключается непосредственно к сети, для мягкого пуска используются тиристорные пускатели. СЭПУ используются для того чтобы привести в соответствие характеристики ВЭУ с требованиями сети включая частоту, напряжение, управление активной и реактивной мощностью, гармонический состав и т. д.

Специфической особенностью ВЭУ является непостоянство развиваемой мощности во времени. Ветер по своей природе явление непостоянное. Характеристику мощности ВЭУ целесообразно рассматривать в четырех ветровых зонах: 1-я зона охватывает диапазон изменения скорости от нулевой до начальной рис. 1 (минимальной скорости ветра $u_{\text{мин.}}$, при которой ВЭУ начинает выдавать электроэнергию в сеть); 2-я зона охватывает диапазон изменения скорости ветра $u_{\text{мин.}}$ - $u_{\text{ном.}}$, при котором ВЭУ работает в режиме выработки переменной мощности; 3-я – это диапазон изменения скорости ветра от расчетной номинальной $u_{\text{ном.}}$ до максимальной рабочей скорости ветра $u_{\text{макс.}}$ (режим поддержания выдачи в сеть номинальной мощности $P_{\text{ном.}}$); 4-я - зона скоростей ветра, выше максимально допустимой рабочей [2]. Зависимость мощности P , вырабатываемой ВЭУ, от скорости ветра u представлена на рис 1.

Общим подходом при преобразовании механической энергии, при низкой скорости, в электрическую энергию является использование генератора со стандартной частотой вращения и мультипликатора. Основной, в плане электрической машины, в таких системах является асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором (АГКЗР), либо асинхронный генератор с

фазным ротором (АГФР). Однако есть тенденция к применению многополюсных генераторов, которые позволяют свести к минимуму передаточное число мультипликатора, либо вовсе избавиться от него. Перспективным является применение многополюсного синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ). Такие генераторы, получают вращения напрямую от ветровой турбины (ВТ), и не могут быть включены непосредственно в сеть переменного тока, а требуют, для разделения генератора и сети, обязательного применения СЭПУ.

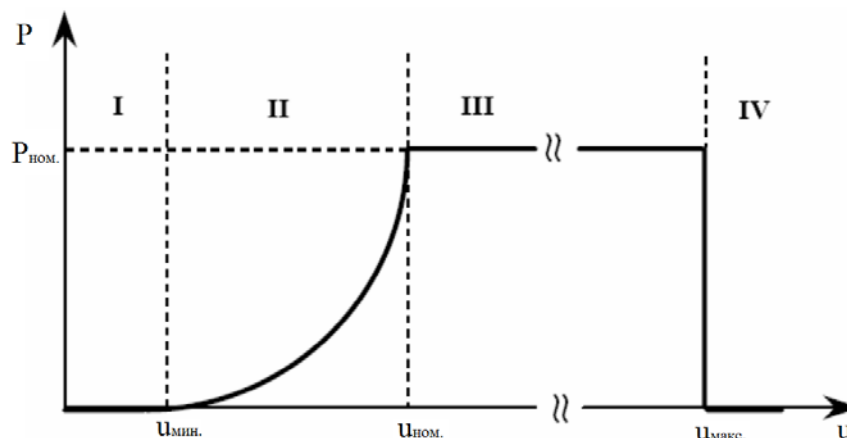


Рис. 1. Зависимость мощности, вырабатываемой ВЭУ, от скорости ветра

Силовая электроника претерпела значительные изменения в последние 30 лет, сфера ее применения расширилась, в основном благодаря совершенствованию силовых полупроводниковых устройств, что позволяет передавать большую мощность, и микропроцессорной техники, обеспечивающих реализацию сложных алгоритмов. Для увеличения надежности и снижения стоимости, число компонентов уменьшается за счет высокого уровня интеграции.

Основным элементом СЭПУ современных ВЭУ является автономные инверторы (АИ), позволяющие управлять передачей активной и реактивной мощности как в одном, так и в обоих направлениях. В качестве АИ в ВЭУ нашли место АИ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения, многоуровневые инверторы и матричные преобразователи. Высокочастотное преобразование с ШИМ генерирует гармоники, как правило, частотой несколько кГц. Благодаря высокой частоте гармоники могут быть легко подавлены посредством фильтров небольших габаритов. Особенностью многоуровневых инверторов является возможность улучшения гармонического состава путем формирования многоступенчатого напряжения, следовательно, уменьшения размеров выходного фильтра.

Рассмотрим некоторые технические решения из разнообразия возможных для СЭПУ, обеспечивающие динамические и статические показатели, способные управлять генератором ВЭУ в широком диапазоне скоростей. Наибольшее распространение получило решение, заключающаяся в непосредственном соединении генератора турбины с сетью. Схема установки

состоит из АГКЗР, соединенного с сетью через трансформатор и работающего с почти постоянной скоростью. При этом реактивная мощность, необходимая для возбуждения, поступает из сети или батареи конденсаторов параллельно соединенных с зажимами генератора. Мощность такой ВЭУ обычно ограничивается на номинальном уровне аэродинамическим путем, т. е. системой управления углом атаки лопастей воздушного потока. Концепция такого управления с постоянной скоростью приведена на рис. 2.

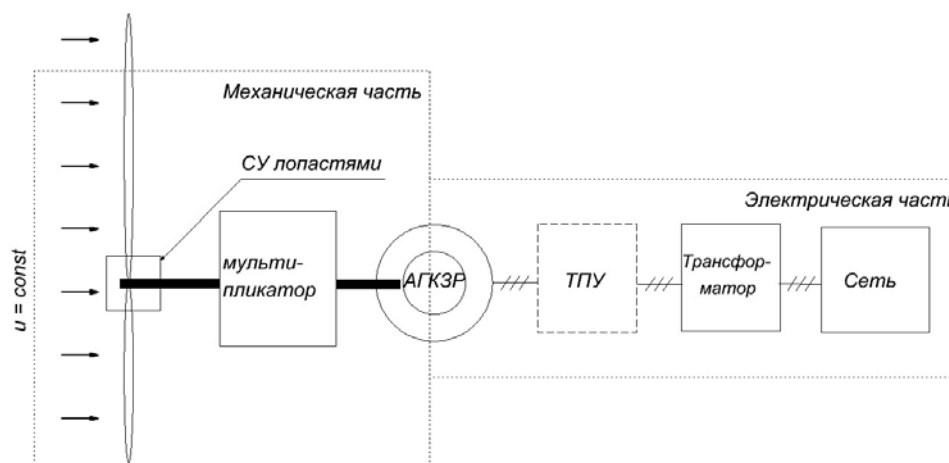


Рис. 2. Концепции управления с постоянной скоростью

Преимущество ВЭУ с асинхронным генератором (АГ) заключается в простоте конструкции и в отсутствии необходимости в синхронизирующем устройстве. В целом такое решение привлекает надежностью и малой стоимостью. Имеются и недостатки: 1) турбина должна работать с постоянной скоростью; 2) требуется сеть для обеспечения стабильной работы; 3) механическая конструкция должна выдерживать механические перегрузки, поскольку порывы ветра могут вызвать пульсации момента в передаче; 4) при использовании для возбуждения батарей конденсаторов, в случае разрыва соединения с сетью, возникает опасность самовозбуждения.

Подключение АГ к силовой системе вызывает переходные процессы, короткие по длительности, но с большими пусковыми токами, что вызывает колебания в сети и броски момента в приводной части турбины соединенной непосредственно с АГ. Это обстоятельство ограничивает количество размещаемых установок в одном районе и на одной участки электросети. Высокое действующее значение пускового тока обычно ограничиваются тиристорным пусковым устройством (ТПУ), до уровня двукратной величины номинального значения тока генератора. После подключения АГ к сети ТПУ шунтируется контактором, который пропускает полный ток нагрузки. В добавление, для уменьшения влияния сети, ТПУ также эффективно демпфирует пики момента, связанные с пиками тока и, следовательно, уменьшает нагрузки на передаточный механизм.

СЭПУ в ВЭУ с переменной скоростью вращения позволяют реализовать режимы работы с переменной мощностью, доля энергии которых весьма значительна. Так при среднегодовой скорости ветра 4 м/с ветроагрегат, развивающий номинальную мощность при 8 м/с, вырабатывает в режиме переменной мощности 60% энергии. С ростом среднегодовой скорости ветра эта доля снижается, но и при среднегодовой скорости ветра 6 м/с ветроагрегат во второй зоне вырабатывает 45% энергии [2]. Такие ВЭУ могут уменьшать или увеличивать скорость вращения ВТ при изменении скорости ветра и момента нагрузки. Это означает меньшие нагрузки на опорную башню, редуктор, систему регулирования угла установки лопастей и другие компоненты механической передачи. Кроме того, системы с переменной скоростью могут увеличивать выработку энергии и уменьшить колебание мощности, передаваемой в сеть. Но главное, что приобретают данный вид ВЭУ, возможность реализовывать алгоритм извлечения максимальной выходной мощности (МВМ)[3].

Мощность, вырабатываемая турбиной, может быть определена:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 u^3 C_p,$$

где ρ – плотность воздуха (кг/м³); R – радиус турбины; u – скорость ветра; C_p – коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ).

КИЭВ C_p является нелинейной функцией быстроходности турбины λ , а также угла установки лопастей β , если в ВЭУ присутствует данная система управления.

Коэффициент λ можно найти из выражения:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{u},$$

где ω – угловая частота вращения лопасти.

Теоретически значение C_p ограничено величиной $C_{p,max}=16/27$. На практике он составляет $0,40 \div 0,45$ [4]. Из рис. 3 следует, что для каждого конкретного угла β имеется такая величина λ , для которой C_p является максимальным, и таким образом ВЭУ имеет на выходе максимальную мощность для данной скорости ветра. Благодаря зависимости C_p и λ , для каждой скорости ветра имеется скорость турбины, которая обеспечивает работу в режиме максимальной выходной мощности (РМВМ). В нормальных условиях турбина с переменной скоростью вращения следует за максимальным КИЭВ $C_{p,max}$, поддерживая максимальное значение мощности вплоть до номинальной скорости за счет изменения скорости вращения ротора поддерживая оптимальное значение быстроходности λ_{opt} .

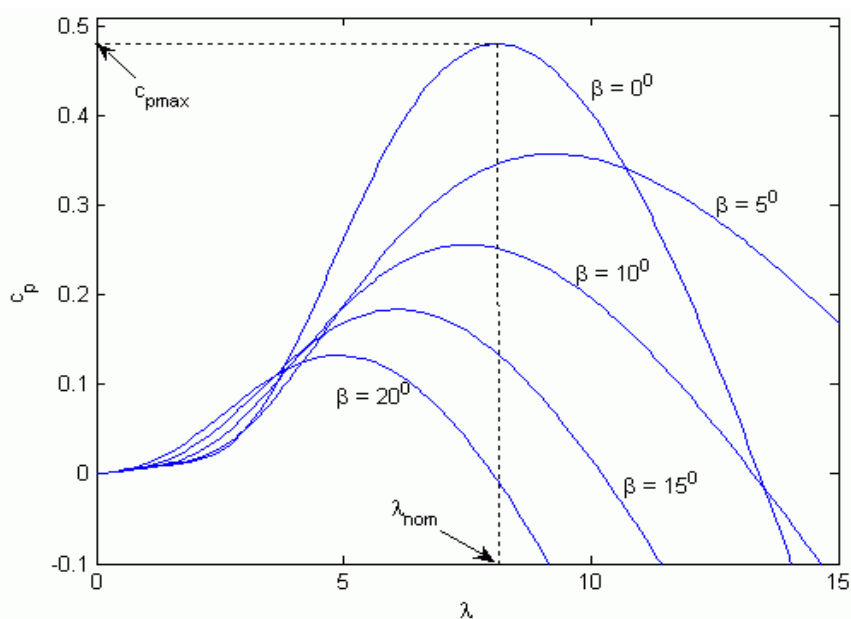


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования C_p от быстроходности ВК λ и угла установки лопастей β

В режиме переменной мощности, генератор настраивается на слежение за точкой максимальной мощности. Известно несколько способов управления ВЭУ для реализации работы в РМВМ [5]:

1. Управление быстроходностью турбины. Основой такого контроллера для РМВМ которого является прибор для измерения скорости ветра – анемометр. Контроллер регулирует скорость вращения турбины для поддержания оптимального значения быстроходности $\lambda_{\text{опт}}$. Однако, измерение скорости ветра представляет некоторую проблему и увеличивает сложность системы. Функциональна, такая система представлена на рис. 4а.

2. Управление с помощью сигнала обратной связи по мощности. Здесь необходимо знание кривой максимальной мощности турбины, что может быть получено путем математического моделирования или экспериментальных исследований. Скорость турбины используется для выбора оптимального значения мощности. Во многих случаях эта кривая мощность может быть заменена «предсказателем» или наблюдателем скорости ветра как функции мощности и скорости турбины. Функциональна, такая система представлена на рис. 4б.

3. Управление путем поискового слежения [6]. Здесь действует следующий принцип: при увеличении скорости турбины выходная мощность должна увеличиваться, в противном случае скорость должна уменьшаться. Однако, этот метод может оказаться неэффективным для больших турбин, поскольку из-за высокого момента инерции механической части, их скорость вращения не может быть изменена достаточно быстро. Функциональна, такая система представлена на рис. 4в.

В практическом применении, имеются контроллеры, которые являются комбинацией всех трех приведенных выше.

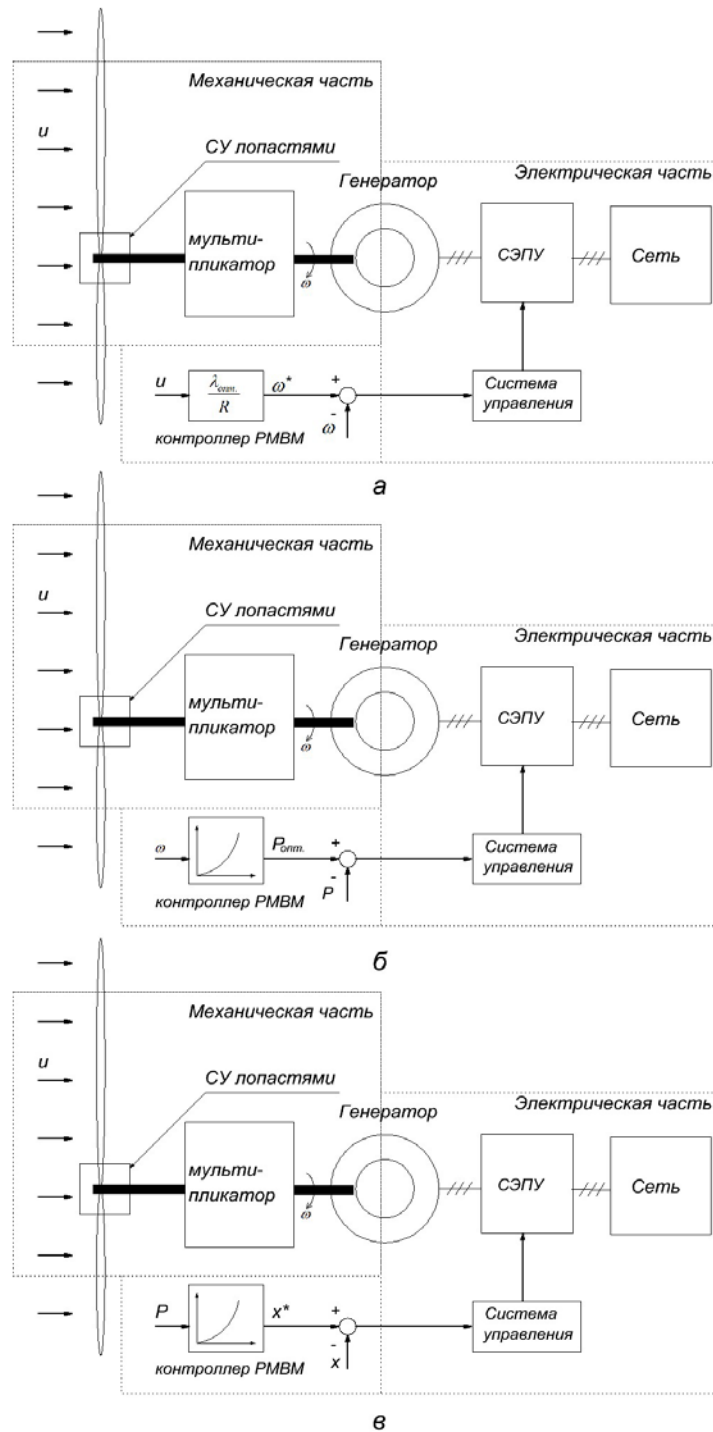


Рис. 4. Функциональные решения ВЭУ, обеспечивающие работу в режиме МВМ

На рис. 5 приведены варианты возможных решений для ВЭУ с применением СЭПУ, для реализации РМВМ. Структура на рис. 5а включает в себя мультипликатор, АГКЗР с СЭПУ на полную передаваемую мощность (СЭПУ-ППМ). Использование АГКЗР имеет свои плюсы такие как низкая стоимость самой электрической машины и ее низкие эксплуатационные требования. Такая система требует двунаправленного потока передачи энергии, т.к. АГКЗР необходима реактивная энергия из сети для возбуждения. Данная задача решается применением СЭПУ-ПМ с

двухсторонней проводимостью, которое и позволяет реализовать алгоритмы РМВМ. Недостаток АГКЗР и СГПМ в том, что они требуют СПУ на полную передаваемую мощность, что в свою очередь также сказывается на мощностях фильтров и делает их более сложными и дорогими. Данной концепции придерживается немецкая компания Siemens[7] для ВЭУ мощностью до 3,6 МВт (табл. 1). При использовании в качестве электрической машины АГФР рис. 5б, СЭПУ с двухсторонней проводимостью включается в цепь ротора и составляет около 25 % от полной мощности ВЭУ что, в свою очередь, положительно сказывается на цене всей установки. При таком соотношении мощностей ВЭУ и СЭПУ в роторной цепи, диапазон регулирования, за счет изменения скорости вращения ротора электрогенератора, расширяется приблизительно на 33% в обе стороны. Данной концепции придерживается (табл. 1) как и компания-лидер Vestas (Дания), так и менее крупные такие как Nordex (Германия), Repower (Германия), Fuhrlander (Германия), Gamesa(Испания), Suzlon (Индия) [8, 9, 10 11 12]. Это объясняется наилучшим соотношением «цена-качество» таких ВЭУ. Структурные схемы установок с многополосными СГПМ, представленные на рис. 5в, 5г и 5д, отличаются от выше указанных отсутствием мультипликатора, тем самым значительно повышая надежность работы всей ВЭУ. Каждый из приведенных вариантов позволяют применить один из трех алгоритмов РМВМ. Все они имеют практически идентичные характеристики с точки зрения управления, поскольку генератор разъединен с сетью преобразователем постоянного тока. Та часть преобразователя, которая соединена с сетью, позволяет управлять активной и реактивной мощностью с большим быстродействием. Недостатком является более сложная система с чувствительной электронной частью. Такого пути придерживается ведущий поставщик на рынок ВЭУ Германии Enercon[13] и фирма Siemens для турбин «мультимегаватного» класса [14]. Вышеупомянутый мировой лидер компания Vestas также направляет свои усилия на переход к использованию СГПМ. Так ВЭУ серии GridStreamer [15] отличаются от более ранних моделей меньшим повышающим числом мультипликатора и использованием СГПМ (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики ВЭУ мировых производителей

Фирма производитель	Страна производитель	Модель ВЭУ	Номинальная мощность ВЭУ, кВт	Наличие/отсутствие мультипликатора	Тип применяемого генератора	Возможность работы с перем. скор.	Рабочий диапазон, м/с	Номинальная скорость ветра, м/с
Enercon	Германия	E - E2 82/2000kW	2000	отсутствует	многополосный СГПМ	да	6-31	17,5
Repower	Германия	MM100	2000	есть	АГФР	да, 12,5 % за счет возб-ия	3-22	11
Suzlon	Индия	S97	2100	есть	АГФР	да	3,5-25	11
Nordex	Германия	N117	2400	есть	АГФР	да, 27,5 % за счет возб-ия	3-20	
Fuhrlander	Германия	FL 2000	2050	есть	АГФР	да	3.5-25	12.5
Gamesa	Испания	G97	2000	есть, 1:106,8	АГФР	да, 30% за счет возб-ия		
Siemens	Германия	SWT – 2,3 - 82 VS	2300	есть, 1:91	АГКЗР	да	4-25	13,5
Siemens	Германия	SWT – 6,0 - 154	6000	отсутствует	многополосный СГПМ	да	4-25 (max 70)	12-14
Vestas	Дания	V80	2000	есть	СГПМ	да	3,5-25	14,5
Vestas	Дания	V110	2000	есть	АГФР	да	-20	11,5

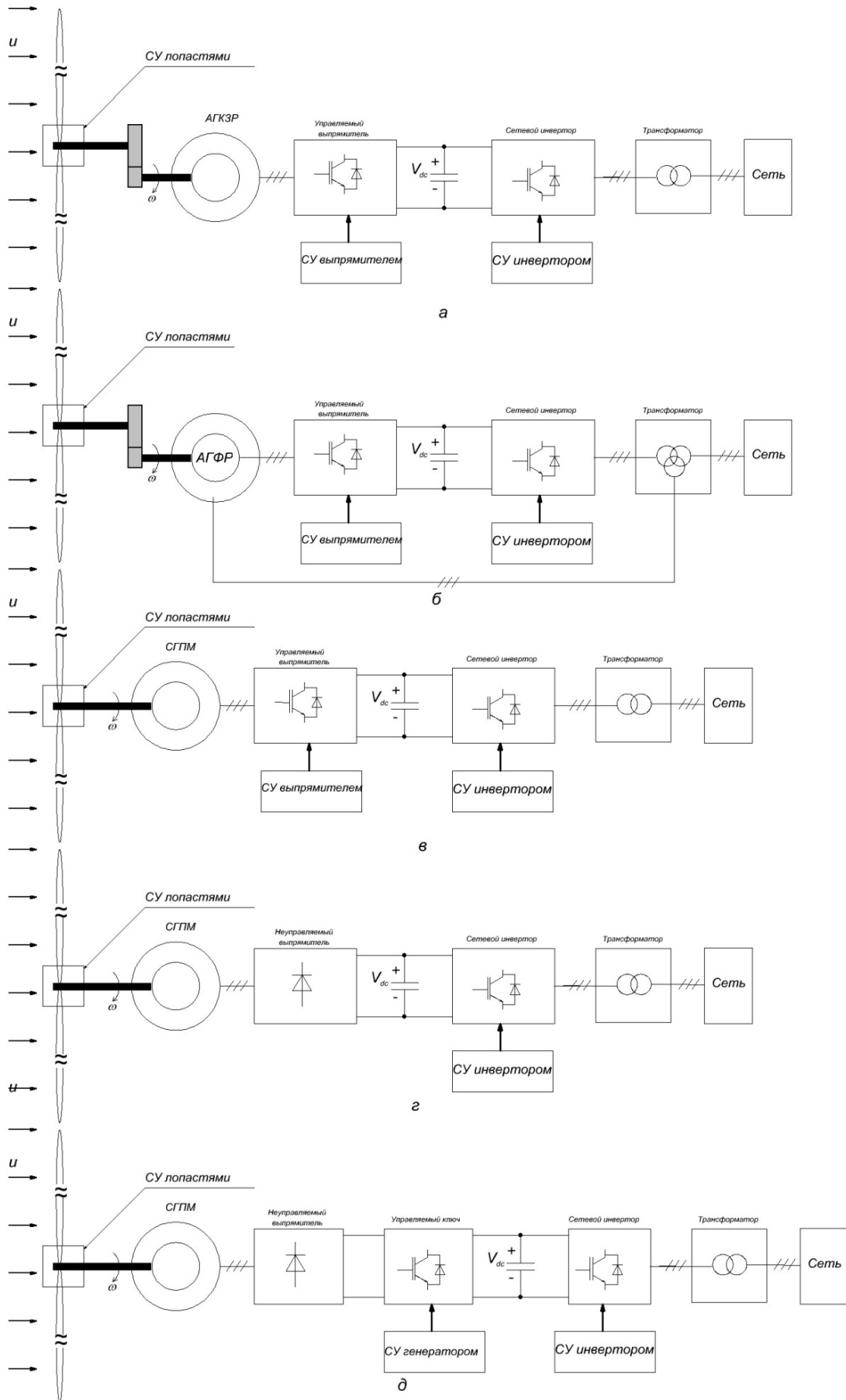


Рис. 5. Структурные схемы ВЭУ для реализации PMBM

Применение той или иной типовой схемы ВЭУ обусловлено в первую очередь условиями эксплуатации установки. Под условиями эксплуатации подразумевается: географическое расположение установки, наличие/отсутствие постоянного ветра, энергетические характеристики сети электроснабжения, характер потребителей генерируемой энергии и др. Так выше упомянутая модель АДКЗР работающего напрямую с сетью, наиболее эффективна применительно к морским шельфовым и прибрежным ВЭУ, а также для установок, расположенных в каньонах и ущельях предгорья, на берегах крупных водоемов. Такие установки работают с постоянными годовыми, постоянными сезонными или постоянными по времени суток ветрами. Обобщая выше сказанное, можно утверждать, что такие ВЭУ не требуют широкого диапазона регулирования и оптимизированы под преобладающую скорость ветра. В случае же внутриконтинентального базирования, в том числе РБ, ветер зачастую не обладает определенной направленностью и более «размыт» в диапазоне скоростей. В таких условиях ВЭУ, с непосредственным соединением генератора турбины с сетью, будет работать с частыми остановками и последующими вводами в работу. Такой режим скажется на качестве генерируемой энергии из-за наличия разрывов в ее выработке и высоких пусковых токов при возвращении системы в работу. Кроме того, пусковые режимы заметно снижают срок службы как механического, так и электрического оборудования установки. ВЭУ внутриконтинентального базирования, должны работать при переменной скорости ветра, т.е. обладать более широким рабочим диапазоном, поддерживать режим МВМ, а это возможно только при применении современных СЭПУ. Следует также учитывать, что номинальные скорости ветра для ВЭУ с многополостными СГПМ несколько выше (см. табл. 1) чем для ВЭУ с АГФР. Этот факт может сыграть определяющую роль при выборе ВЭУ для конкретной площадки.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены основные концепции в проектировании современных ВЭУ.
2. Приведен анализ способов управления РМВМ и применяемых для этих целей СЭПУ, а также сравнительный анализ оборудования ведущих мировых производителей, выявлены основные тенденции развития электроприводов современных ВЭУ.
4. Приведены функциональные схемы систем для различных электрических генераторов, механических передач и для различных комбинаций СЭПУ.
3. Определены структуры ВЭУ с СЭПУ наиболее полностью отвечающие условиям эксплуатации в РБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Global Wind Energy Council** // Global Wind Statistics 2012 [Electronic resource]. – Brussels, 2013. – Mode of access: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/glob_cum_inst_wind-cap_1996-2012.jpg. – Date of access: 04.04.2013.
2. **Харитонов В.П.** Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280с.
3. **Петренко Ю.Н., Санкевич С.А.** Разработка алгоритма управления, обеспечивающего максимально высокую выходную мощность ветроэнергетической установки с накопителями энергии // Электроника, автоматика и измерительная техника: межвузовский сборник научных трудов с международным участием / Уфимский гос. авиационный тех. ун-т; под науч. ред.: Г. В. Миловзоров. – Уфа, 2011. – с. 47-52.
4. **Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.** Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы – Харьков: ХАИ, 2003. – 400 с.
5. **Thongam, S.** MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems / S. Thangam, M. Ouhrouche// Fundamental and Advanced Topics in Wind Power/ InTech; Edited by Rupp Carriveau. – Rijeka, 2011. – p. 339-361.
6. **Санкевич, С. А.** Петренко Ю.Н. Применение контролера нечеткой логики для управления ветроэлектрической установкой / С. А. Санкевич // Информационные технологии и системы 2012: материалы междунар. науч. конф., Минск, 24 октября 2012 г. / БГУИР; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2012. – с. 66-67.
7. **Siemens company** // Wind Power [Electronic resource]. – Erlangen, 2013. – Mode of access: http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/wind-power/E50001-W310-A123-X-4A00_WS_SWT-2.3-82%20VS_US.pdf – Date of access: 21.05.2013.
8. **Nordex company** // Products & Servic [Electronic resource]. – Hamburg, 2013. – Mode of access: http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Gamma/Nordex_Gamma_en.pdf – Date of access: 21.05.2013.
9. **Repower company** // Wind Turbines [Electronic resource]. – Hamburg, 2013. – Mode of access: http://www.repower.de/fileadmin/download/produkte/PP_MM100_uk.pdf – Date of access: 21.05.2013.
10. **Fuhrlaender company** // Technik [Electronic resource]. – Liebenscheid, 2013. – Mode of access: <http://www.fuhrlaender.de/?id=252> – Date of access: 21.05.2013.
11. **Gamesa company** // Products & Service [Electronic resource]. – Madrid, 2013. – Mode of access: <http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos-servicios/aerogeneradores/catalogo-g9x-20-mw-eng.pdf> – Date of access: 21.05.2013.
12. **Suzlon company** // Products [Electronic resource]. – Pune, 2013. – Mode of access: <http://www.suzlon.com/pdf/Suzlon-S9X-product-brochure.pdf> – Date of access: 21.05.2013.

13. Enerkon company // Products & Servic [Electronic resource]. – Bremen, 2013. – Mode of access: <http://www.enercon.de/de-de/62.htm> – Date of access: 21.05.2013.

14. Siemens company // Wind Power [Electronic resource]. – Erlangen, 2013. – Mode of access: http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/6_MW_Brochure_Jan.2012.pdf – Date of access: 21.05.2013.

15. Vestas company // Procurement [Electronic resource]. – Aarhus, 2013. – Mode of access: <http://www.vestas.com/en/wind-power-plants/procurement/turbine-overview/v80-2.0-mw-gridstreamer%E2%84%A2.aspx#/vestas-univers> – Date of access: 21.05.2013.

РЕФЕРАТ

УДК 621.311.24.01

Информационное обеспечение проектирования ветроэлектрических установок / Ю. Н. Петренко, С. А. Санкевич //

Статья посвящена рассмотрению основных концепции в проектировании современных ВЭУ. Приведен анализ способов управления и систем способных реализовывать режим максимальной выходной мощности. В рамках статьи, рассмотрены три способа обеспечения данного режима работы ВЭУ, такие как: управление быстроходностью турбины; управление с помощью сигнала обратной связи по мощности; управление путем поискового слежения. Приведены функциональные схемы систем для различных электрических генераторов, механических передач и для различных комбинаций силовых преобразовательных устройств. Проведен их сравнительный анализ по данным ведущих мировых производителей ВЭУ. Определены структуры ВЭУ, наиболее полностью отвечающие условиям эксплуатации в РБ.

Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 15 назв.

UDC 621.311.24.01

Solutions of modern wind energy conversion system / Y.N. Petrenko, S. A. Sankevich //

The paper reviews the basic design concepts and power electronic applications for wind energy systems. Various wind turbine systems with different generators and power electronic converters are described and different technical features are compared. The possible methods like power feedback control and hill-climb search control of using the power electronic technology for improving wind turbine performance are discussed.

Fig. 5. Tab. 1. Ref.: 15 titles.

Санкевич Сергей Александрович, пр. г. Минск, Независимости 67, ком. 232, 029-274-15-75,
БНТУ аспирант, науч. рук.: Петренко Ю. Н. канд. техн. наук, доц.

Петренко Юрий Николаевич, г. Минск, ул. Городецкая, дом 32, кв. 72, тел. (рабочий):
2662658, БНТУ, МИДО, канд. техн. наук, доц.