

Kuznetsov Ivan Mixajlovich

Moscow Aviation Institute (State University of Aerospace Technologies).

E-mail: im.kyznetsov@gmail.com.

4, Volokolamskoe hlg, Moscow, 125993, Russia.

Phone: 89265739104.

Pron'kin Andrey Nikolaevich

E-mail: an.pronkin@gmail.com.

Phone: 89162151184.

Veremenko Konstantin Konstantinovich

E-mail: konstver@rambler.ru.

УДК 681.513

А.А. Мазалов**АДАПТИВНАЯ ВЕТРОУСТАНОВКА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
С АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ**

В данной статье рассматривается адаптивная система управления ветроэнергетической установки, обеспечивающая решение задач стабилизации напряжения и частоты на выходе генератора ВЭУ. Целью исследования является разработка системы управления ветроэнергетической установки с асинхронным генератором. В качестве регуляторов по каналам амплитуды и частоты применяются ПИ-регуляторы с переменным коэффициентом интегральной составляющей. Разработана компьютерная модель для исследования системы управления, приведены результаты моделирования.

Ветроэнергетическая установка; адаптивная система управления.

A.A. Mazalov**ADAPTIVE WIND POWER PLANT OF ALTERNATING CURRENT
WITH INDUCTOR MOTOR**

At this article adaptive control system of wind power plant is considered. The problem of stabilizing the output voltage amplitude as well as frequency is solved. To stabilize inductor motor in the generator mode a new adaptive proportional and integral controller is designed. In addition a computer model to study control-executive system is developed.

Wind power plant; adaptive control system.

Введение. В России на альтернативную энергетику приходится всего около 1 % энергетических мощностей, несмотря на то, что наша страна имеет колоссальный потенциал возобновляемых источников энергии. Технический потенциал ветровой энергии России оценивается свыше 50 000 млрд кВт·ч/год. Экономический потенциал составляет примерно 260 млрд кВт·ч/год, т.е. около 30 % производства электроэнергии всеми электростанциями России.

Слабое развитие отрасли связано с комплексом внешних факторов – экономических, технических, законодательных, психологических и информационно-организационных. Одновременно с каждым годом растет понимание необходимости развития альтернативной энергетики, особенно в тех регионах, которые по комплексу причин не имеют и не будут иметь централизованного энергоснабжения. Итак, отметим основные причины слабого развития ветроэнергетики в России:

1. Обжитая часть России бедна ветровыми ресурсами. Средняя скорость ветра в 4 – 5 метров в секунду характерна для большинства промышленных районов. Малая скорость ветра означает малую мощность ветрового

потока. И, кроме того, значительное количество безветренных дней. ВЭУ в России в основном будут работать треть или половину времени.

2. Ветрообильные районы – это прибрежные территории, расположенные вдоль морей и крупных озер. Побережье Северного Ледовитого океана, побережье Тихого океана имеют хороший ветровой потенциал, но мало обжиты и поэтому создание ветроустановок, ветропарков представляет там сложности.
3. Незрелость собственной технической базы, в то время как большинство европейских ветроустановок на малых скоростях ветра показывают неудовлетворительную работу.

Но существуют регионы, которые достаточно обжиты и при этом имеют хорошие ветровые ресурсы. К таким районам можно отнести несколько километров побережья в Ленинградской области, вокруг Финского залива и Ладожского озера, морское побережье Ростовской области и Краснодарского края, а также Приморский край (район Владивостока). Однако же стоимость таких установок остаётся достаточно высокой и, соответственно, увеличивается срок окупаемости проекта.

Структура адаптивной ВЭУ. Технологические решения, разработанные на кафедре электротехники и мехатроники ТТИ ЮФУ, позволяют удешевить стоимость конструкции отдельной ветроустановки до 50 % по сравнению с аналогами, а также функционировать в широком диапазоне ветров, от 1 м/с до 20 м/с. Основная идея состоит в том, что, используя в качестве генератора асинхронную машину переменного тока с фазным ротором (АМПТФР) и подавая на него переменное напряжение определённых параметров, обеспечивается устойчивый генераторный режим при изменении электрической нагрузки и вариациях вращения вала ветродвигателя из-за колебаний скорости ветра.

Структурная схема такой ВЭУ приведена на рис. 1. В отличие от традиционной схемы, здесь инвертор располагается не в выходной цепи генератора, а в роторной цепи, т.е. в цепи возбуждения. Это позволяет выбирать его меньшей мощности, что положительно сказывается на цене всей установки. Необходимо отметить, что мощность инвертора будет определять мощность всей установки в безветренные часы, так как в этом случае ток будет течь от аккумуляторной батареи (АБ) либо иного резервного источника (например, солнечные модули или дизель-генератор) через автоматическое зарядное устройство (АЗУ) и далее через инвертор, генератор и в нагрузку. АМПТФР при неподвижном роторе фактически работает как трансформатор, но так как такой режим работы не является нормальным, то необходимо не допускать превышения силы тока в обмотках максимально допустимых значений. Иными словами, на выбор инвертора влияют 2 фактора-ограничения:

1. Максимальный ток в обмотках при неподвижном или слабо вращающемся роторе.
2. Желаемая мощность установки в безветренные часы.

Контроль за током в обмотках осуществляется системой управления (СУ), и при достижении током критического значения её реакцию можно настроить. Например, на отключение от сети установки при максимальном токе статора (т.е. когда мощность нагрузки равна, либо превышает номинальную).

Второе ограничение можно обойти, изменив схему подключения резервного источника энергии. Например, при подключении параллельно ветрогенератору синхронного генератора, приводимого во вращение двигателем внутреннего сгорания, его произведённая энергия идёт сразу в сеть.

Основное назначение инвертора – преобразование постоянного напряжения с выхода резервного источника, либо управляемого выпрямителя в переменное та-

ких параметров, при которых подача его на фазный ротор генератора позволит получить на его выходе переменное напряжение заданных параметров, например 50Гц/380В. Иными словами, зная с какой частотой вращается вал генератора, а также мощность подключённой к нему электрической нагрузки, можно рассчитать параметры напряжения возбуждения так, что при подаче его на ротор напряжение на выходе ветроустановки будет всегда стабильным. Расчётом этих параметров и контролем ветроустановки в целом занимается система управления.

При хороших условиях ветра СУ может направить часть энергии, производимой генератором, на заряд АБ и на вход инвертора. Приведённая схема не является единственно возможной для такого типа ВЭУ.



Рис. 1. Структурная схема адаптивной ВЭУ

Алгоритмы адаптивной системы управления. Как уже было отмечено, СУ служит для расчёта параметров напряжения возбуждения, подаваемого на ротор, и контролем ветроустановки в целом. СУ контролирует такие параметры, как частоту вращения вала ветроколеса, токи и напряжения статора, ротора и выпрямителя, а ответной реакцией на значения этих параметров являются:

1. Частота и амплитуда напряжения возбуждения.
2. Угол управления α выпрямителя. Иными словами, происходит управление потоком энергии, необходимой для заряда АБ и работы инвертора.
3. Сигналы АЗУ на заряд или разряд батареи.
4. Сигнал на замыкание или размыкание выключателей в той или иной цепи ветроустановки (например, управление главным выключателем, соединяющим установку и сеть или нагрузку).

Система управления позволяет придать адаптивные свойства ВЭУ, обеспечивая стабилизацию частоты и амплитуды выходного напряжения генератора при изменении скорости ветра и тока нагрузки. ВЭУ представляет собой нелинейную многосвязную систему, поэтому для синтеза ее системы управления в общем случае требуется применять адаптивные методы, изложенные в [1 – 3]. В данном случае осуществляется стабилизация ВЭУ в заданном режиме, что позволяет использовать классические ПИ-регуляторы.

Рассмотрим подробнее, каким образом поддерживается стабильность выходного напряжения генератора в различных условиях. В начальный момент времени система управления в соответствии с текущими оборотами вала ВЭУ и электрической нагрузки, формирует параметры напряжения возбуждения, которое через

преобразователь частоты подается в обмотки ротора. Частота напряжения на выходе генератора зависит от частоты вращения магнитного поля ротора, а она, в свою очередь, складывается из частоты вращения вала генератора и частоты вращения магнитного поля, создаваемого переменным напряжением ротора, т.е. можно записать [4]:

$$f_{\text{ген}} = f_{\text{вала}} + f_{\text{возб}}, \quad (1)$$

где $f_{\text{ген}}$ – частота напряжения на выходе генератора;

$f_{\text{вала}}$ – частота вращения вала;

$f_{\text{возб}}$ – частота управляющего напряжения в обмотках ротора.

Таким образом, можно поддерживать постоянной частоту генерируемого напряжения. Если направление вращения ротора генератора не совпадает с направлением вращения магнитного поля, создаваемого его обмотками, то перед $f_{\text{возб}}$ в формуле (1) ставится знак “-”.

Поддержание постоянным амплитудного значения выходного напряжения генератора связано с некоторыми сложностями, так как его колебания связаны не только с частотой вращения ротора и подключённой нагрузкой, но также и с внутренними параметрами генератора, такими как сопротивления, индуктивности обмоток и др.

Регулируя амплитуду напряжения, подаваемого на ротор, можно поддерживать постоянной амплитуду выходного напряжения генератора. В качестве такого регулятора используется ПИ-регулятор с переменным коэффициентом интегрирования. Его реализация представлена в виде следующих выражений:

$$u_p = k_n (u_{\text{стаб}} - u_{\text{тек}}) + k_u \int (u_{\text{стаб}} - u_{\text{тек}}) dt \quad (2)$$

$$k_u = F(f_{\text{вала}}, R_n, a) \quad (3)$$

где $u_{\text{стаб}}$ – требуемая амплитуда выходного напряжения генератора; $u_{\text{тек}}$ – напряжение в данный момент времени в одной статорной фазе, измеренное между фазой и землёй; k_n, k_u – коэффициенты усиления пропорциональной и интегральной составляющих регулятора.

Коэффициент k_n является константой и его величина определяется путем настройки каким-либо стандартным методом. Коэффициент k_u – изменяется в зависимости от текущих условий работы ВЭУ, вычисляется с использованием передаточной функции генератора, рассчитанной по Т-образной схеме замещения и может быть представлен в виде

$$k_u = \frac{u_{\text{стаб}}}{30} * \left(1 + \frac{R_{\text{рот}}}{R_{\text{магн}}} \right)^2 \left(\frac{R_{\text{прив}} + R_{\text{нагр}}}{R_{\text{нагр}}} \right)^2 \left(\frac{F_{\text{стат}} - AF_{\text{рот}}}{F_{\text{стат}}} \right)^2, \quad (4)$$

где $R_{\text{прив}} = \frac{R_{\text{рот}} R_{\text{магн}}}{R_{\text{рот}} + R_{\text{магн}}} + R_{\text{стат}}$ – сопротивление части схемы замещения;

$R_{\text{рот}}, R_{\text{стат}}, R_{\text{магн}}, R_{\text{нагр}}$ – соответственно приведённые сопротивления ротора, статора, магнитное и нагрузки; $F_{\text{стат}}, F_{\text{рот}}$ – частота напряжения на выходе генератора и частота вращения ротора соответственно; A – эмпирический коэффициент.

Так как коэффициенты усиления пропорциональной и интегральной составляющих регулятора обычно подбираются для конкретного объекта в процессе настройки регулятора, то же было сделано и в этом исследовании. Однако было обнаружено, что подобрав их для определённой скорости ветра и нагрузки, при других значениях этих величин регулятор начинал работать неудовлетворительно. Главным образом, на стабильность и скорость регулирования влияет интегральная составляющая регулятора, и её числовое значение приблизительно совпадает с тем, которое определяет амплитуду поданного в итоге на ротор напряжения. Для того чтобы определить это значение, была выведена передаточная функция (4). Поэтому, прежде чем начать регулирование и подбирать амплитуду напряжения возбуждения при текущей скорости ветра и нагрузке, СУ приблизительно оценивает её, и исходя из этой величины определяется интегральная составляющая. После этого регулятор начинает свою работу. Вычисления ведутся до тех пор, пока невязка, или рассогласование $U_{stab} - U_{mek}$ не станет равна нулю.

Таким образом, основываясь на выражениях (1) и (2), система управления рассчитывает требуемые параметры напряжения возбуждения, передаёт их в инвертор, который физически создаёт и подаёт его на ротор. Независимо от того, какая нагрузка подключена и с какой скоростью будет вращаться вал генератора, на его выходе будет трёхфазное напряжение с постоянными частотой, амплитудой и фазой, т.е. вся система является адаптивной.

Результаты моделирования. Для реализации и исследования системы управления создана компьютерная математическая модель МПФР на основе нелинейного описания машины переменного тока во вращающихся координатах [2]. Общая структура модели ВЭУ и адаптивной системы управления представлены на рис. 2 и 3.

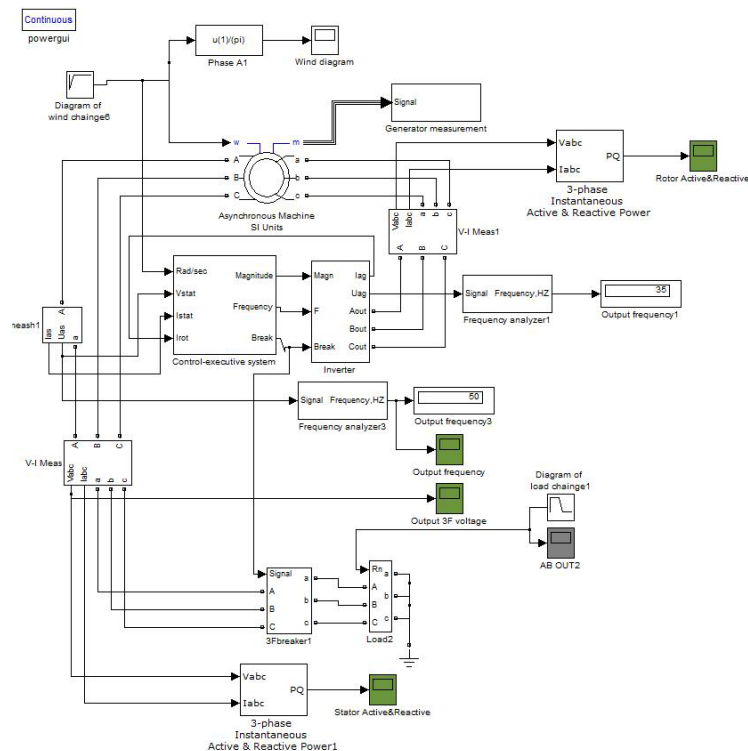


Рис. 2. Модель ВЭУ

Основными элементами модели являются асинхронная машина в режиме генератора (Asynchronous Machine), система управления (Control System), инвертор (Inverter) и нагрузка (Load2). Остальные элементы являются вспомогательными и служат для измерения или отображения результатов моделирования, представленных на рис. 3 – 6.

Моделирование осуществлялось следующим образом. В начальный момент времени ротор генератора начинает своё вращение с определённой частотой, задаваемой блоком Diagram of wind change. СУ, исходя из этих параметров, начинает регулирование выходного напряжения до тех пор, пока рассогласование не станет равным 0 (момент времени 0-1 с на рис. 3, 4). В момент времени 1 с частоты вращения ротора меняется, возникает рассогласование, и за время 0,5 с системой управления вновь осуществляется регулирование. В момент времени 3 с меняется мощность подключаемой нагрузки, вновь возникает рассогласование и следующее за ним регулирование. На рис. 5 показан результат работы регулятора, т.е. изменение амплитудного значения во времени напряжения, поданного на ротор.

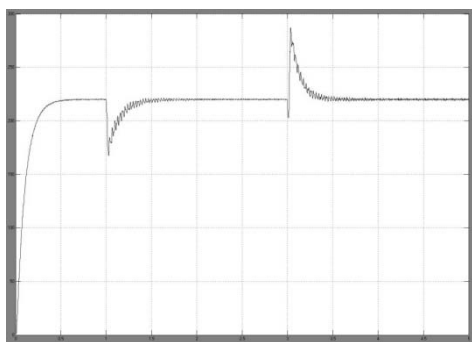


Рис. 3. Амплитуда напряжения на выходе ВЭУ

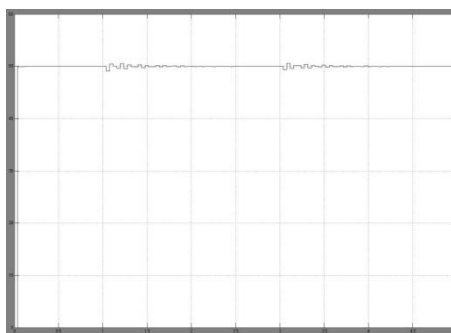


Рис. 4. Частота напряжения на выходе ВЭУ

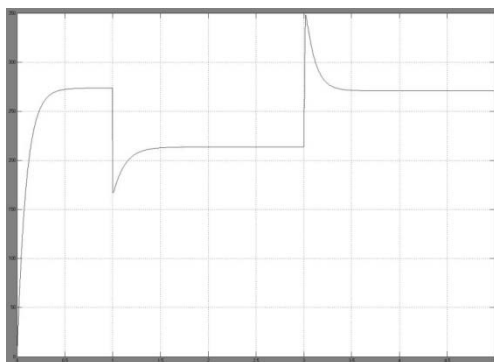


Рис. 5. Амплитуда напряжения на выходе регулятора

Заключение. Данная работа демонстрирует реализацию алгоритмов стабилизации параметров выходного напряжения асинхронного генератора с фазным ротором. С помощью компьютерного моделирования были практически подтверждены преимущества такого подхода. Так, гибкость требований, предъявляемых к адаптивной системе, была реализована с применением ПИ-регулятора с переменным коэффициентом интегральной составляющей.

Созданная компьютерная модель подтвердила ожидаемые результаты, показала практическую реализуемость заложенных в разрабатываемую систему управления методов и алгоритмов, позволила оценить их инновационность и перспективность. Результаты моделирования подтверждают высокую работоспособность синтезированной адаптивной системы управления ВЭУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Медведев М.Ю.* Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация, управление. – М., 2006. – № 6. – С. 17-22.
2. *Медведев М.Ю.* Структура и алгоритмическое обеспечение нелинейного наблюдателя производных в условиях действия случайных шумов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 20-25.
3. *Медведев М.Ю., Борзов В.И., Пилюхов В.Х.* Автономные управляемые ветроэнергетические установки // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 202-207.
4. *Вольдек А.И.* Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974.
5. *Башарин А.В. и др.* Примеры расчетов автоматизированного электропривода. – Л.: Энергия, 1971.

Мазалов Андрей Андреевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: Anmaz8@list.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371694.

Mazalov Andrey Andrejevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: Anmaz8@list.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371694.