

**УДК 620.98**

С.В. Соловьев, аспирант кафедры Общей Электротехники (Санкт-Петербургский горный университет)  
Г. Санкт-Петербург

## **ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ НА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

Ветроэнергетика является наиболее быстро развивающейся отраслью возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ). Средний рост установки ветрогенераторов в мире растет на 30% ежегодно последние 10 лет [1]. В 2006 году установленная мощность доходила до 74 ГВт, в то время как в 2005 эта величина была порядка 59 ГВт. Ожидается, что к 2020 году эта цифра достигнет 1260 ГВт, что является 12% от общего потребления электроэнергии в мире. В России также идет развитие ветроэнергетики, особенно на побережье северной части, где скорость ветра достигает высоких среднегодовых отметок [2]. Более того, Правительством России в 2003 году был издан закон «Об электроэнергетике», в котором в ст.3 закрепляется понятие ветроэнергетики, а также указаны основные направления поддержки развития этой отрасли электроэнергетики. Распоряжением Правительства от 28 июля 2015 года № 1472 были созданы дополнительные стимулы для увеличения генерируемых мощностей от ВИЭ и были предложены экономические стимулы для создания парков ветрогенераторов или других ВИЭ. Таким образом, можно судить о высоком интересе в развитии ветроэнергетики в мире и в России в частности.

Развитие данной отрасли энергетики напрямую зависит от разрабатываемых конструкций ветрогенераторов, в которых центрально место занимают генераторы, которые диктуют использование тех или иных приводов. Существует три основных типа генераторных систем для ветрогенераторов [3]. Первый тип – асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором (АГКЗ), напрямую подсоединенными к сети. Второй – генератор двойного питания (ГДП) и трансмиссией. Конвертор такой конструкции питает обмотки ротора и составляет порядка 30% от номинальной мощности генератора. Третий тип – генератор с регулируемой скоростью вращения, но без трансмиссии. В таких генераторах, используются многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ) и конверторы с номинальной мощностью генератора.

Первым рассматривается концепт использования генераторов с фиксированной скоростью с трансмиссией и короткозамкнутым ротором, как показано на рисунке 1.

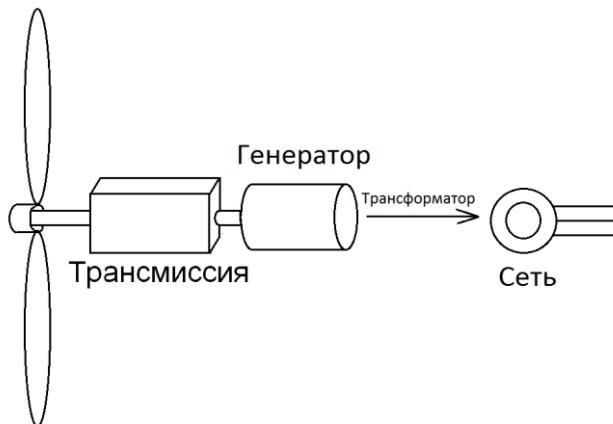


Рис. 1 Схема подключения ветрогенератора к сети

Достоинством АГКЗ является надежность, простота исполнения и цена изготовления. Также такая система совместима с регулированием угла атаки лопастей, что позволяет в совокупности с постоянной скоростью вращения ротора подключать такие машины напрямую к сети. К недостаткам АГКЗ можно отнести следующие факторы [4,5]. Невозможность регулирования скорости, из-за которых, если генератор выходит за пределы регулирования возникает большое скольжение, ведущее к дополнительным потерям. При сильном изменении скорости ветра на валу и трансмиссии возникают сильные усталости, что ведет к дополнительному износу оборудования. Трансмиссия занимает большое количество места, имея большую массу, что приводит к дополнительной тратае материалов на изготовление гондолы ветрогенератора.

Модификации подобной системы появились в 90ые годы в Дании. Было предложено использовать генератор с фазным ротором, в котором управление осуществляется за счет изменения сопротивления ротора при помощи преобразователя и поворотом лопасти для изменения угла тангажа. Несмотря на то, что в данной системе большой предел изменения скорости вращения ротора, остается проблема с высоким скольжением. Таким образом, предел изменения скорости вращения не превышает 10%.

Развивая подобную идею, была разработана концепция использования машин двойного питания в ветрогенераторах (рис. 2). Статор отдает мощность напрямую в сеть, в то время как ротор подключен через силовой преобразователь. Преобразователь регулирует частоту ротора, следовательно и его скорость вращения. Такая система поддерживает управление в широких пределах.

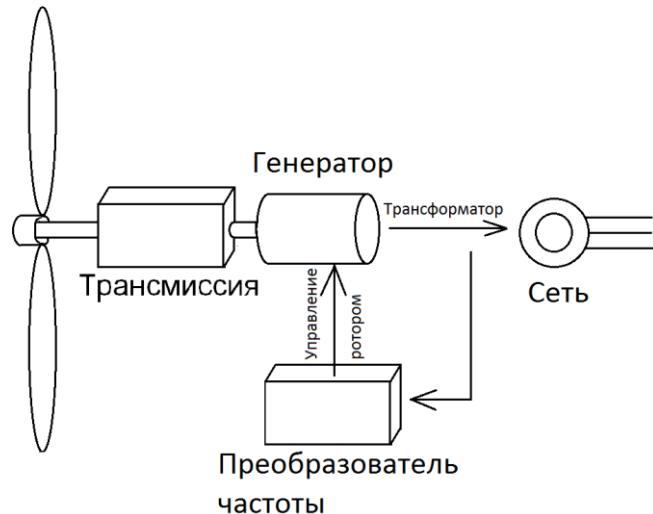


Рис. 2 Схема подключения генератора двойного питания в составе ветрогенератора к сети.

Изменение скорости вращения варьируется в пределах 30% от синхронной скорости [6]. Номинальная мощность преобразователя составляет 25-30% от мощности генератора, что делает такую систему привлекательной для большого количества компаний – изготовителей. В отличие от предыдущих концептов, где при регулировании, даже в небольших пределах, энергия рассеивалась на сопротивлении, в данной системе она может быть отдана в сеть через сетевой инвертор в составе преобразователя частоты [7].

Тем не менее, подобная топология также имеет ряд недостатков. Все еще требуется трансмиссия, так как скорость вращения ротора далека от скорости вращения ветроколеса. Кольца фазного ротора остаются слабым звеном в подобных машинах и требуют частого ремонта, что в высоких мачтах ветрогенераторов является серьезным недостатком. Так как статор подключен к сети напрямую, при аварийных ситуациях, он никак не защищен, поэтому требуется защита.

Получила распространение также топология с использованием возбуждения постоянным током (рис. 3). Статор по конструкции схож с асинхронными машинами, наибольшее распространение получил явнополюсный ротор. Амплитуда и частота напряжения управляются на стороне генератора, таким образом, его скорость может варьироваться в широких пределах, даже на низких оборотах ветроколеса. Более того, подобная система способна управлять магнитным потоком для уменьшения потерь в обмотках, так как ток возбуждения управляется за счет преобразователей.

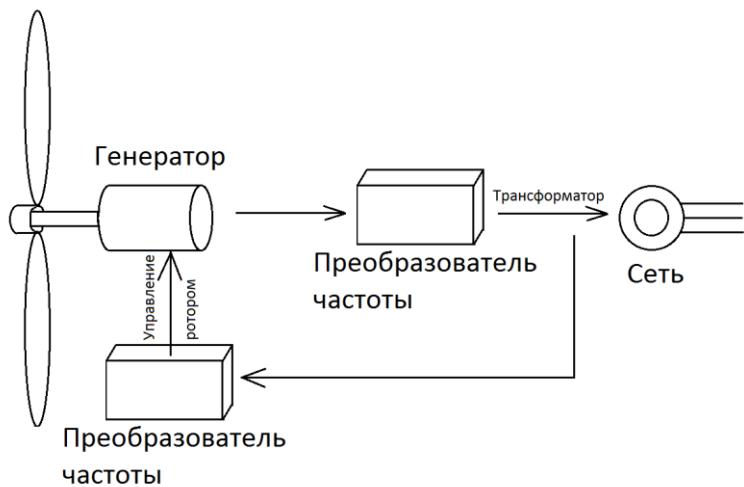


Рис. 3. Схема подключения синхронного генератора с электромагнитным возбуждением

Сравнивая подобную топологию, лишенную трансмиссии, с топологией, включающей в себя механические элементы, отмечается ряд недостатков: для возбуждения роторных обмоток постоянным током используются щетки или бесщеточные возбудители, в такие моменты происходят значительные потери мощности. Также конструктивные особенности диктуют геометрию крыла, а также специальное управление тягнажом лопастей, что значительно увеличивает вес лопасти, влияя на рабочие диапазоны скорости ветра.

В сравнении с синхронным генератором с электромагнитным возбуждением (рис. 4), синхронные генераторы с постоянными магнитами имеют ряд преимуществ. Более высокая эффективность, не требуется питания возбуждения обмоток, более высокая надежность, ввиду отсутствия фазных колец. Также благодаря конструктивным особенностям СГПМ легче и занимает меньше места.

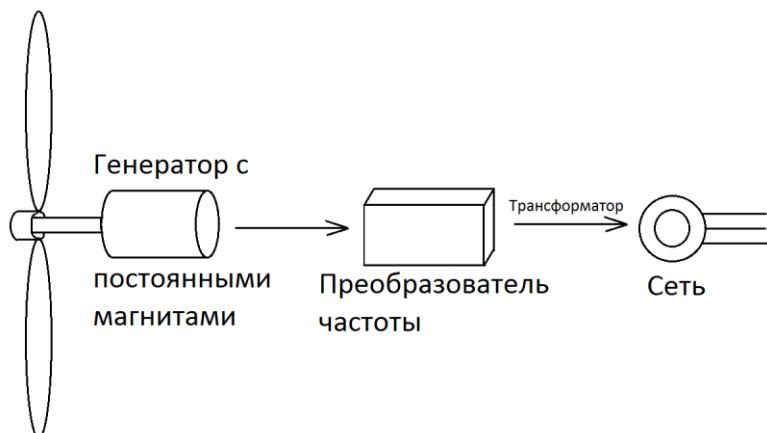


Рис. 4 Схема подключения синхронного генератора к сети

Тем не менее, существует ряд недостатков. Основные связаны со сложностью изготовления магнитов, а следовательно и высокой ценой. Постоянные магниты чувствительны к высоким температурам, при которых происходит процесс размагничивания. Уменьшения цены на постоянные магниты в будущем сделает такой вид ветрогенераторов наиболее конкурентоспособным в промышленной энергетике.

Сравнивая все виды рассмотренных машин можно судить, о том, что сейчас, имея наибольшую популярность, АСКЗ будут постепенно при росте мощностей отходить на второй план, занимая нишу ветрогенераторов для малых промышленных установок и домашнего использования. По сравнению с ними машины с постоянными магнитами имеют более высокую эффективность, в среднем на 2,3% и на 1,6% по сравнению с синхронными генераторами при мощности 500 кВт [8] без постоянных магнитов. Имея меньшие габариты и отсутствие трансмиссии, ведет к существенному уменьшению габаритов, следовательно, экономии материала, которые компенсируются ценой на постоянные магниты. Также синхронные генераторы имеют больший потенциал при увеличении номинальной мощности. Планируется ввод рабочих мощностей до 20 МВт, где синхронные генераторы будут иметь значительное преимущество.

Если сравнить синхронный генератор с электромагнитным возмущением и машину двойного питания с трансмиссией, то можно прийти к выводу, что подключение генератора напрямую к сети будет более дорогостоящим и тяжелым [9]. Также сравнивая машину двойного питания с генератором на постоянных магнитах, отмечается, что денежные затраты на постоянные магниты меньше, чем на материал для двухобмоточной системы.

В ходе анализа было определено, что использование синхронный генераторов на постоянных магнитах в ближайшем будущем будет приоритетным, за счет отказа от механических элементов и удешевления материалов. Более надежное управление и его относительная простота делают такую топологию ветрогенераторов наиболее перспективной.

#### Список литературы:

1. CHEN Z, BLAABJERG F: ‘Wind energy-the world’s fastest growing energy source’, IEEE Power Electron. Soc. Newslett., 2006, 18, (3), pp. 15– 19
2. Росэнергосервис, электронная библиотека по энергетики «Возобновляемая энергия в России» - электронный ресурс [URL: <http://lib.rosenergoservis.ru/2011-07-20-04-56-55.html?start=2>]

3. HANSEN AD, HANSEN LH: ‘Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995 – 2004)’, Wind Energy, 2007, 10, (1), pp. 81– 97
4. POLINDER H, VAN DER PIJL FFA, DE VILDER GJ, ET AL.: ‘Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines’, IEEE Trans. Energy Convers., 2006, 21, pp. 725– 733
5. HANSEN LH, HELLE L, BLAABJERG F, ET AL.: ‘Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines’ Riso National Laboratory Technical Report Riso-R-1205(EN) Roskilde, Denmark, December 2001
6. DUBOIS MR, POLINDER H, FERREIRA JA: ‘Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines’.
7. С.Б. Крыльцов, О.Б. Шонин. Алгоритмы управления сетевыми инверторами на основе теории мгновенной мощности // Современная наука и практика №1(1), август 2015, Санкт-Петербург, 2015, с.25-30
8. GRAUERS A: ‘Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines’. PhD dissertation, Chalmers University of Technology, Goteburg, 1996
9. SIEGFRIEDSEN S, BO HMEKE G: ‘Multibrid technology – a significant step to multi-megawatt wind turbines’, Wind Energy, 1998, , pp. 89– 100