

УДК 621.313

А. В. Переверзев, Д. Г. Алексеевский, В. В. Семенов, А. Н. Буров, Г. Н. Стрункин,  
А. В. Таранец

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРАНОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ АУТОНОМНЫХ ВЭУ

*Рассмотрены особенности работы асинхронного двигателя краново-металлургической серии в генераторном режиме в автономной ветроэлектростанции небольшой мощности.*

Основными недостатками автономных ветроэлектростанций (ВЭУ) в настоящее время являются высокая стоимость сооружения и низкий коэффициент использования оборудования, обусловленный нестабильностью ветрового потока. Один из возможных путей совершенствования такого рода электрогенерирующих систем заключается в использовании серийных асинхронных машин с фазным ротором в сверхсинхронном режиме [1]. Отметим преимущества электрогенерирующей системы на базе асинхронного генератора с фазным ротором (АГФР), по сравнению с такими системами, созданными на базе синхронных генераторов:

- снижение установленной мощности генератора, поскольку полезная мощность снимается как с обмоток статора, так и с обмоток ротора;
- снижение установленной мощности преобразовательной части электрооборудования, так как примерно половина полезной мощности снимается непосредственно с обмоток статора;
- повышение коэффициента использования энергии ветрового потока благодаря возможности регулирования частоты вращения вала ветроагрегата при изменении скорости ветра;
- удешевление ветротурбины, поскольку рассматриваемая система позволяет использовать ветроагрегат с нерегулируемыми лопастями.

Анализ существующего рынка электрических машин с фазным ротором (малой и средней мощности) показал, что наибольшее распространение получили асинхронные двигатели краново-металлургических серий. Двигатели такого типа предназначены для работы в повторно-кратковременном двигательном режиме. Особенности работы таких машин в генераторном (сверхсинхронном) режиме в литературе освещены недостаточно. Имеются лишь работы [2], посвященные общей теории асинхронных генераторов, а также источники [3], в которых представлен анализ специализированных асинхронных машин большой мощности. Поэтому исследование режимов работы серийной асинхронной машины в составе автономной ВЭУ является актуальным.

Статья посвящена анализу режима работы серийного кранового двигателя с фазным ротором (на примере машины типа МТФ-111-6 мощностью 3,5 кВт) в генераторном режиме в составе автономной ВЭУ. Структурная схема автономной системы электроснабжения, созданной на базе АГФР [1], приведена на рис. 1.

© А. В. Переверзев, Д. Г. Алексеевский, В. В. Семенов, А. Н. Буров, Г. Н. Стрункин, А. В. Таранец 2008 г.

Система содержит асинхронный генератор с фазным ротором (АГФР), возбуждение которого осуществляется от автономного инвертора напряжения (АИН), работающего с широтно-импульсной модуляцией и формирующего статорные напряжения синусоидальной формы. Постоянное напряжение на входе инвертора стабилизируется с помощью зарядно-разрядного устройства (ЗРУ), представляющего собой реверсивный импульсный преобразователь, обеспечивающий согласование напряжения резервной аккумуляторной батареи (АБ) с напряжением на входе инвертора. Как будет показано далее, при использовании серийной машины рабочее напряжение на обмотках статора целесообразно выбирать несколько ниже номинального. Поэтому для формирования стандартного выходного напряжения на нагрузке установлен на выходе системы вольтодобавочный трансформатор (ВТ).

Для отвода мощности скольжения АГФР в цепи ротора генератора включен неуправляемый выпрямитель (НВ), выходное напряжение которого поступает через импульсный преобразователь (ИП) и звено постоянного тока на вход инвертора АИН. Если нагрузка инвертора недостаточно велика, то мощность скольжения может передаваться через зарядно-разрядное устройство ЗРУ в аккумуляторную батарею АБ.

Следует отметить, что автономный инвертор создает как ток намагничивания АГФР, так и реактивный ток нагрузки. Реверсивный импульсный преобразователь, установленный на входе АИН, позволяет обеспечить баланс активной мощности в системе без регулирования режима работы генератора. По суще-

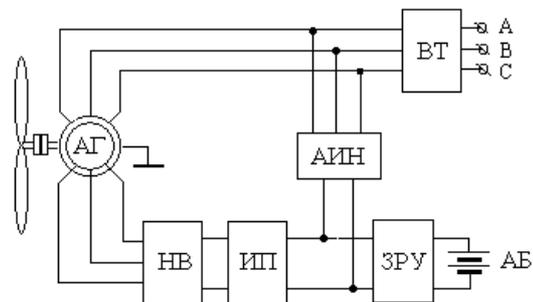


Рис. 1. Структурная схема автономной ВЭУ на базе асинхронного генератора с фазным ротором

ству, совокупность ЗРУ и АИН представляет собой источник бесперебойного питания, энергетические ресурсы которого ограничены возможностями аккумулятора. Режим работы АГФР может свободно устанавливаться в зависимости от скорости ветра. Частота вращения вала и момент на валу АГФР регулируются за счет изменения тока ротора с помощью импульсного преобразователя ИП. При этом можно устанавливать такие коэффициенты быстроходности, чтобы обеспечить как максимальный отбор мощности при скоростях ветра ниже номинальной величины, так и ограничение отбираемой мощности при скоростях ветра выше номинальной [4].

Система управления содержит три следующих независимых блока:

- блок стабилизации напряжения на входе АИН (реализуемой с помощью реверсивного импульсного преобразователя ЗРУ);

- блок стабилизации выходного напряжения АИН (осуществляемой за счет изменения коэффициента модуляции);

- блок регулирования момента на валу АГФР в зависимости от скорости ветра (осуществляемого с помощью импульсного преобразователя, позволяющего регулировать ток ротора АГФР).

Как известно из [5], зависимость момента на валу ветроколеса от частоты его вращения (при постоянной скорости ветра) представляет собой куполообразную функцию параметра, называемого «коэффициентом быстроходности» и учитывающего соотношение между скоростью ветра и скоростью лопасти ветроколеса. Можно показать, что при изменении скорости ветра и выборе оптимальных коэффициентов быстроходности момент на валу ветроколеса изменяется пропорционально квадрату скорости ветра [6]. Регулирование момента на валу генератора (и, соответственно, частоты вращения ветроагрегата) в рабочем диапазоне скоростей ветра должно осуществляться таким образом, чтобы обеспечить оптимальную величину коэффициента быстроходности при скорости ветра, меньшей от номинальной.

В свою очередь, при скоростях ветра выше номинальных частота вращения снижается таким образом, чтобы момент на валу ветроколеса не превышал своего номинального значения. Механические характеристики ветроагрегата приведены на рис. 2. Как показано в [6], номинальный режим генератора целесо-

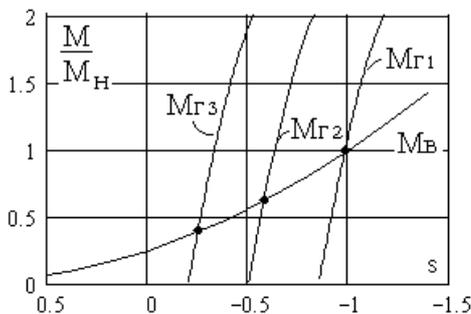


Рис. 2. Механические характеристики ВЭУ

образно выбирать при скольжении равном минус единице (то есть, номинальная частота вращения должна быть в два раза выше синхронной скорости). При этом мощность скольжения, генерируемая в цепи ротора, равна мощности в цепи статора, а мощность на валу генератора (без учета потерь) равна сумме этих мощностей.

Расчет характеристик системы большой мощности (с использованием крупных электрических машин) можно выполнить по соотношениям, приведенным в [3]. В то же время, для широкого класса установок малой и средней мощности возможно применение серийно выпускаемых асинхронных машин, и, в частности, – краново-металлургических. Поскольку асинхронные двигатели такого типа предназначены для использования в повторно-кратковременном режиме, то применение их в длительном режиме требует соответствующего перерасчета электромеханических параметров. Для выполнения подобных расчетов необходимо иметь параметры схемы замещения асинхронной машины, которые не всегда проектировщику известны. Эти параметры могут быть получены в результате проведения экспериментальных испытаний, но на практике такие испытания трудоемки и требуют специального испытательного стенда с соответствующей измерительной аппаратурой. Усредненные параметры схемы замещения могут быть рассчитаны по номинальным данным машины [7], если предварительно задаться значением коэффициента приведения Г-образной схемы замещения:

$$C1 = 1 + \frac{x_1}{x_o} = \frac{U_1}{E_1}, \quad (1)$$

где  $x_1$  – реактивное сопротивление рассеяния статора;  $x_o$  – реактивное сопротивление контура намагничивания;  $U_1$  – значение напряжения на обмотке статора;  $E_1$  – значение ЭДС в контуре намагничивания.

После этого, используя величину напряжения на кольцах ротора  $E_{2k}$ , можно вычислить коэффициент трансформации  $K_T$ . Сопротивление ротора  $r_2$  можно найти через мощность скольжения, а сопротивление статора  $r_1$  и реактивное сопротивление короткого замыкания  $X_k$  можно получить после решения следующей системы уравнений [7]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{pmU_1^2}{2\omega_1 C1 \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_k^2} \right)} &= M_k, \\ \frac{C1 \cdot r_2'}{\sqrt{r_1^2 + X_k^2}} &= s_k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\omega_1$  – угловая частота сети;  $M_k$  – критический момент в двигательном режиме;  $s_k$  – критическое скольжение (определяемое через формулу Клосса).

По найденным параметрам схемы замещения вычисляются значение и фаза приведенного к статорной обмотке тока ротора  $I_2'$ , что позволяет рас-

считать ток намагничивания и определить параметры контура намагничивания. После этого уточняется значение  $C1$ , и при значительном его отклонении расчет повторяется. Задача упрощается, если существует возможность непосредственного измерения активных сопротивлений обмоток статора и ротора. По изложенной методике (активные сопротивления обмоток были предварительно измерены) был выполнен расчет параметров схемы замещения двигателя типа МТФ-111-6 с номинальными параметрами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1. Номинальные параметры двигателя типа МТФ-111-6

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность на валу (при ПВ = 40%), кВт	3,5
Номинальное число оборотов, об/мин	895
Максимальный момент, НМ	87
Номинальный ток статора (фазный), А	10,4
Номинальный ток ротора, А	15
Напряжение на кольцах ротора, В	165

В результате расчета получены следующие параметры:  $r_1 = 1,5$  Ом,  $r_2 = 0,6$  Ом,  $X_k = 5,6$  Ом,  $X_o = 37,4$  Ом,  $C1 = 1,07$  и  $K_T = 2,1$ . Анализ приведенных данных показывает, что при номинальном скольжении фаза вектора роторного тока  $I_2'$  не превышает единиц градусов (примерно можно считать этот ток активным). Принимая во внимание относительно невысокое значение номинального коэффициента мощности анализируемого двигателя, можно сделать вывод об относительно высокой доле тока намагничивания в токе статорной обмотки. На это следует обратить внимание, поскольку в условиях ветроагрегата асинхронная машина должна работать в длительном режиме (желательно, чтобы токовые нагрузки были снижены). Номинальный ток обмоток двигателя для длительного режима можно вычислить из соотношения [7]:

$$I_{ндл} = I_{ном} \sqrt{\frac{ПВ\%}{100}} \quad (3)$$

Тогда допустимая по нагреву величина тока статора снижается – до 6,5 А, а тока ротора до 9,5 А. Если учесть, что ток намагничивания (для нашего случая равный 5,8 А) при номинальном напряжении на обмотке статора в длительном режиме сохраняется на прежнем уровне, то можно сделать вывод о том, что для сохранения допустимого теплового режима обмоток в длительном режиме необходимо существенно снизить нагрузочную составляющую тока статора. Это приведет к недоиспользованию нагрузочной способ-

ности ротора (поскольку ток ротора связан с нагрузочной составляющей тока статора через коэффициент трансформации). Решением проблемы является снижение напряжения на статоре, что позволит снизить ток намагничивания и, соответственно, увеличить нагрузочную составляющую тока статора. С другой стороны, очевидно, что уменьшение напряжения статора и соответствующее уменьшение магнитного потока машины должны приводить к уменьшению мощности генератора.

Для поиска оптимального значения статорного напряжения требуется наличие характеристики холостого хода машины. Для рассматриваемого примера такая характеристика была снята экспериментально, а затем - аппроксимирована полиномом:

$$I_o(U_1) = 0,016 \cdot U_1 + 5 \cdot 10^{-5} U_1^2, \quad (4)$$

где  $I_o$  – значение тока намагничивания, А;  $U_1$  – значение напряжения статорной обмотки, В.

Задавшись допустимым значением тока статора в длительном режиме  $I_{ндл}$  и полагая, что векторы тока ротора  $I_2'$  и тока намагничивания  $I_o'$  примерно ортогональны (рис. 3), можно рассчитать значение приведенного тока ротора  $I_{2\partialл}'$  в длительном режиме:

$$I_{2\partialл}' = \sqrt{I_{ндл}^2 - I_o^2(U_1)}. \quad (5)$$

Значение тока ротора в длительном режиме вычисляется умножением тока  $I_{2\partialл}'$  на коэффициент трансформации:

$$I_{2\partialл} = I_{2\partialл}' K_T. \quad (6)$$

Определим мощности, отдаваемые обмотками статора:

$$P_1 = U_1 \cdot I_{2\partialл}' - I_{2\partialл}'^2 \cdot r_1 \quad (7)$$

и ротора:

$$P_2 = s \cdot E_{2k} \cdot I_{2\partialл} - I_{2\partialл}^2 \cdot r_2, \quad (8)$$

где  $s$  – скольжение генератора.

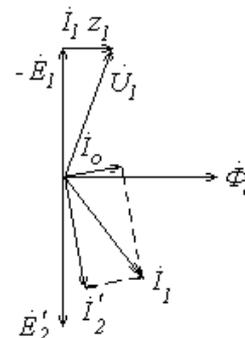


Рис. 3. Векторная диаграмма АГФР

Вычислим полную мощность генератора:

$$P_n = P_1 + P_2. \quad (9)$$

Результаты расчетов по приведенным формулам (выполненные для случая  $s = -1$ ), представленные в относительных единицах, показаны на рис. 4 (за базовые величины приняты номинальное напряжение и допустимые значения токов в длительном режиме).

Приведенные зависимости показывают, что со снижением напряжения на статоре быстро увеличивается допустимое значение нагрузочной составляющей статорного тока, что приводит к соответствующему росту допустимого тока ротора. Максимальные зна-

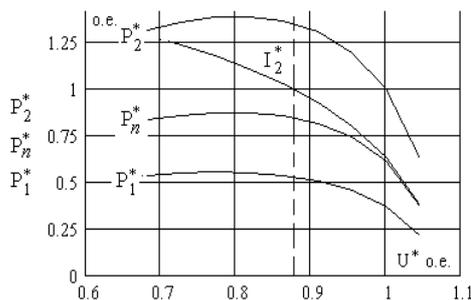


Рис. 4. Зависимости мощностей и тока ротора от напряжения на статоре АГФР

чения мощности создаются при токе ротора больше допустимого значения (пунктирная линия). Таким образом, возможное снижение статорного напряжения в данном случае ограничено ростом тока ротора и составляет примерно (10–12) %.

Следует отметить, что абсолютные значения мощности могут быть достаточно велики, поскольку базовая мощность одной фазы статора (в длительном режиме) равна 1430 Вт, ротора – 906 Вт, а полная мощность двух обмоток – 2336 Вт. Таким образом, при

$P_n^* \approx 0,8$  (рис. 4) полная мощность, отдаваемая тремя фазами генератора, равна 5,6 кВт, что значительно превышает номинальную мощность на валу рассматриваемой машины в двигательном режиме (знаком \* обозначаются значения в относительных единицах).

Для согласования напряжения на статоре со стандартным номинальным напряжением на нагрузке  $U_{ном}$  можно использовать вольтодобавочный трансформатор, установленная мощность которого пропорциональна отклонению напряжения на статоре от его номинального значения. В рассматриваемом примере для двигателя МТФ-111-6 установленная мощность составляет:

$$S_T = 3(U_{ном} - U_1)I_H = 3 \cdot (220 - 192) \cdot 6 = 504 \text{ ВА} \quad (10)$$

*Розглянуті особливості роботи асинхронного двигуна краново-металургійної серії у генераторному режимі в автономній вітроелектроустановці невеликої потужності.*

*Working distinctive features of asynchronous engine of the crane-metallurgical series in the generator mode in autonomous wind power station of small power are considered.*

Если суммарную массу двигателя МТФ-111-6 и вольтодобавочного трансформатора сравнить с массой двигателя более высокой мощности из этой же серии (МТН-112-6), то окажется, что замена на более мощный двигатель приведет к ухудшению массогабаритных показателей системы на (10–15) %.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- серийные асинхронные двигатели с фазным ротором могут достаточно эффективно применяться в автономных ВЭУ, что позволит избежать разработки и изготовления специального асинхронного генератора с уменьшенным током намагничивания;
- для оптимального использования активных материалов машины в генераторном режиме требуется снижение статорного напряжения на величину, определяемую параметрами схемы замещения машины;
- перспективна разработка специального асинхронного генератора, характеризующегося уменьшенным током намагничивания и предназначенного для работы в длительном режиме, что позволит улучшить технико-экономические показатели ВЭУ.

### Перечень ссылок

1. Патент на корисну модель № 26494 Україна, МПК H02K 17/34 (2007.01). Автономна вітроелектрогенеруюча система / Алексієвський Д. Г., Буров О. М., Веселов К. І., та ін. Заявлено 11.05.2007; Опубл. 25.09.2007. Бюл. № 15.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
3. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
4. Переверзев А. В., Алексеевский Д. Г., Семенов В. В. Траектория регулирования ветроэлектрогенерирующей системы на базе сверхсинхронного вентильного каскада. // Технічна електродинаміка. Тем. випуск: ПСЕ-2002. – Ч. 7. – К.: ІЕД НАН України, 2002. – С. 77–80.
5. Patel M. R. Wind and solar power systems. CRC Press, Boca Raton, 1999. – 283 p.
6. Алексеевский Д. Г., Семенов В. В. Оптимизация рабочего скольжения асинхронных генераторов для ВЭУ на базе сверхсинхронного вентильного каскада. // Технічна електродинаміка. Тем. випуск ПСЕ-2000. – Ч. 8. – К.: ІЕД НАН України, 2000. – С. 81–84.
7. Цейтлин Л. С. Электропривод, электрооборудование и основы управления. – М.: Высш. школа, 1985. – 192 с.

Поступила в редакцию 15.04.08 г.

После доработки 12.06.08 г.