

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МУЛЬТИПЛИКАЦИЕЙ

*В статье рассмотрены направления повышения эффективности принципиально новой схемы ветроэлектрических установок (ВЭУ) с аэродинамической мультипликацией (АМ), обеспечивающих работу с сетью без преобразователей частоты при переменных оборотах ветроколеса.*

*Показана возможность использовать высокочастотные генераторы с совмещенными обмотками для повышения единичной мощности ВЭУ АМ свыше 1000 кВт.*

*Рассмотрены возможности использования в преобразователях частоты ведомых сетью инверторов (ВСИ) с преобразователями повышающего напряжения и автономных инверторов напряжения (АИН).*

*Для обеспечения электромагнитной совместимости с сетью приведены рекомендации по выбору схем преобразователей частоты.*

**Ключевые слова:** ветроэлектрическая установка, аэродинамическая мультипликация, преобразователь частоты, ведомый сетью инвертор, автономный инвертор, эффективность, электромагнитная совместимость.

### ВСТУПЛЕНИЕ

Истощение традиционных источников энергии, неравномерное распределение их месторождений, возрастающая экологическая опасность вызывают необходимость в использовании нетрадиционных источников энергии, среди которых значительная доля принадлежит ветроэнергетике.

Все признаки, необходимые для развития ветроэнергетики, присущи в Украине, обоснованный потенциал которой составляет 16 ГВт [1].

### ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ

Мировая тенденция развития энергетики свидетельствует о высоких темпах прироста установленных мощностей ВЭУ, который в 2010 г. достиг 24 % [1]. Повышение эффективности ВЭУ связано прежде всего с увеличением единичной мощности до нескольких МВт. Самая крупная ВЭУ в мире типа Е126 мощностью 7,5 МВт реализована в 2007–2009 гг. фирмой Enercon [1, 2]. Характерной особенностью этой ВЭУ является отсутствие мультипликатора за счет использования тихоходного синхронного генератора, что является существенным шагом в конструировании ВЭУ с точки зрения повышения ее КПД, надежности, уменьшения эксплуатационных затрат на обслуживание.

Поскольку мощные ВЭУ работают с переменной частотой генераторов, то для согласования их с промышленной сетью необходимы преобразователи частоты (ПЧ), в составе которых используются АИН или ВСИ, схемные решения которых определяются мощностью, уровнем напряжения, назначением и электромагнитной совместимостью ВЭУ с сетью [3, 4, 5]. Анализ состояния развития ветроэнергетики в Украине свидетельствует о наличии серьезного подхода к этой проблеме.

Отечественная фирма ДТЭК «ООО Винд Пауэр» заявила о широкой программе строительства ряда ВЭС суммарной мощностью 14 ГВт. Первая очередь Ботиевская ВЭС (Запорожская обл., Украина) мощностью 90 МВт из планируемых 200 МВт вступила в строй в 2012 г. На станции установлены турбины типа V112-30 с мультипликатором и генератором, единичной мощностью 3 МВт фирмы Vestas Central Europe.

В конце 2002 г. ПФГ «Конкорд» (г. Днепропетровск, Украина) приступила к созданию принципиально новой безмультипликаторной ВЭУ типа ТГ-750, основные решения которой защищены патентом Украины №49970 по заявке 2000031794 от 30.03.2003 г. Дальнейшее развитие этой схемы получено в установках ТГ-750М и ТГ-1000 [6, 7].

Сущность предложенной схемы ВЭУ заключается в установке ветротурбин на лопастях ветроколеса (рис. 1), что обеспечивает аэродинамическую мультипликацию оборотов синхронного генератора ветротурбин и позволяет генерировать электроэнергию в сеть с постоянной частотой при переменных оборотах ветроколеса [7] без ПЧ.

Эти основные отличия ВЭУ АМ от классических схем ВЭУ позволяют существенно упростить электромеханическую систему генерирования электроэнергии, что способствует снижению ее себестоимости.

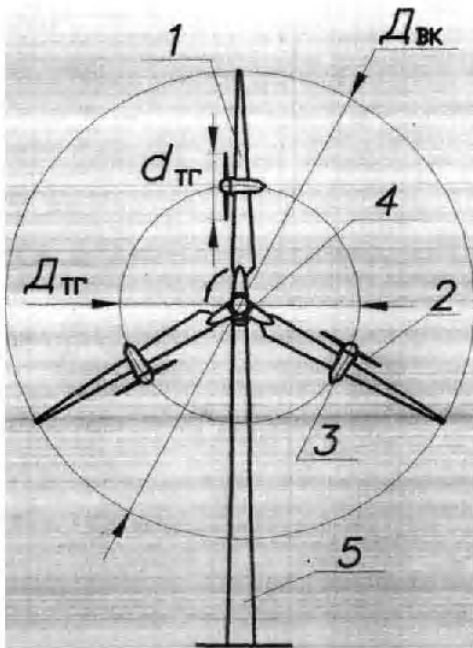
Однако такие системы имеют ряд особенностей, которые снижают эффективность ее:

- колебания ротора, связанные с природой электромагнитных колебаний синхронных генераторов;
- для работы в автономном режиме необходим ПЧ;
- при работе с малыми скоростями ветрового потока  $\leq 5$  м/с снижается эффективность отбора мощности ветрового потока [8];
- при увеличении мощности ВЭУ АМ существенно возрастает вес генераторов, работающих на частоте 50 Гц.

Таким образом, в Украине имеется значительный задел в создании безмультипликаторных схем ВЭУ, отражающих наиболее перспективное направление в создании ВЭУ, что может быть использовано для производства и совершенствования ВЭУАМ.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Исследование путей повышения эффективности преобразования энергии в электромеханической системе ВЭУ АМ.



1 – лопасти ветроколеса, 2 – лопасти ветротурбины  
3 – генератор, 4 – гондола, 5 – башня

**Рис. 1.** Схема турбогенераторной установки ВЭУ АМ

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

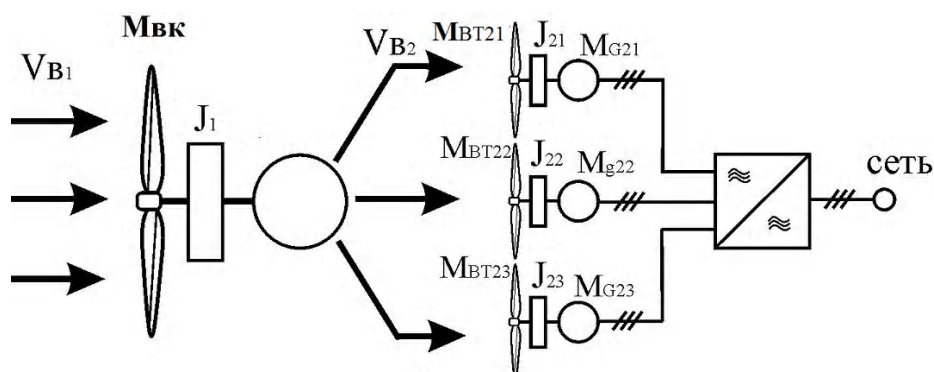
Как указывалось ранее, основным преимуществом ВЭУ АМ является ее способность работать с постоянной частотой вращения ветрогенератора, при переменной частоте вращения ветроколеса, что позволяет производить подключение к сети без промежуточных ПЧ.

В работе [7] было проведено исследование зависимости вырабатываемой мощности ВЭУ АМ от скорости ветрового потока при постоянной частоте вращения ветрогенератора. Обобщенная принципиальная схема электромеханической системы представлена на рис. 2.

В результате исследований было установлено, что при работе с неизменной частотой вращения ветрогенератора, генерация энергии происходит во всем диапазоне изменения скоростей ветрового потока ( $V_{B^*}$ ).

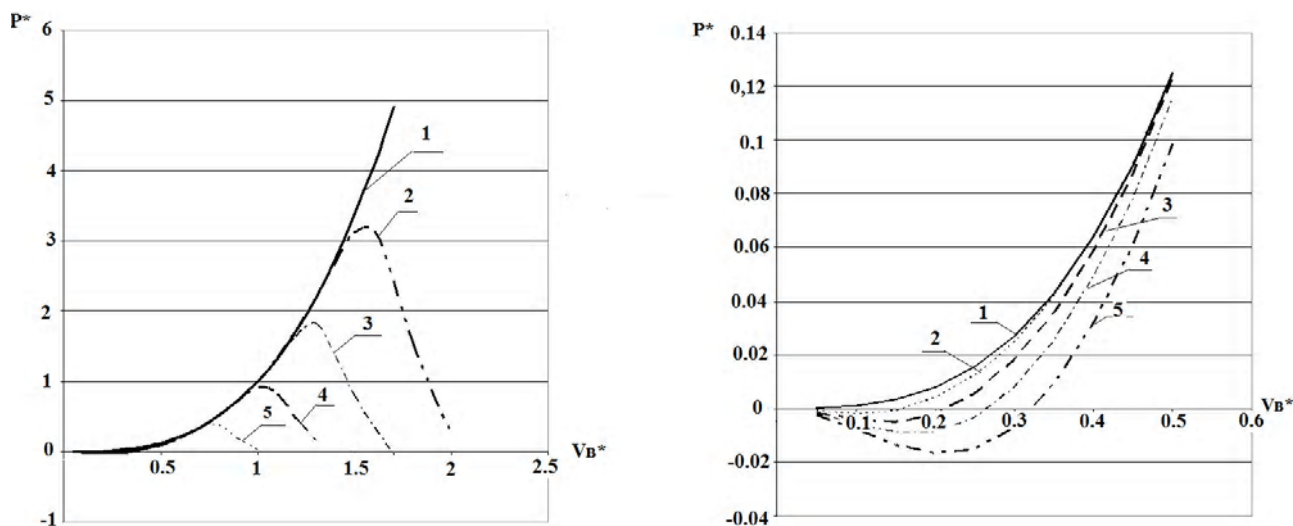
Зависимости генерируемой относительной мощности  $P^*$  в функции относительной скорости ветрового потока  $V_{B^*}$  и скорости вращения генератора  $\omega_{st}$   $P^* = f(V_{B^*}, \omega_{st})$  представлены на рис. 3 [7] для ВЭУ АМ типа ТГ-1000.

Из анализа графиков следует, что при относительной скорости  $V_{B^*} \leq 0,5$  отклонение расчетной генерируемой мощности от максимальной составляет  $3 \div 10\%$ , что снижает эффективность работы ВЭУ при скоростях ветрового потока менее  $5 \div 6$  м/с, характерной для значительной части времени для многих районов Украины. Для повышения отбора мощности необходимо снижать обороты генератора. При  $V_{B^*} \leq 0,5 \div 0,6$  достаточно снизить обороты генератора в 2 раза, чтобы это отклонение было минимальным. Но в этом случае частота и величина генерируемого напряжения отличаются от частоты и напряжения сети, и для согласования требуется установка ПЧ, установленная мощность которого составляет  $10 \div 20\%$  от номинальной.



$V_{B1}, V_{B2}$  – скорости первичного и вторичного ветрового потока;  
 $M_{вк}, M_{вт}, M_{г}$  – моменты ветроколеса, ветротурбины, генератора;  
 $J_1, J_{21}, J_{22}, J_{23}$  – моменты инерции ветроколеса и турбин, соответственно

**Рис. 2.** Обобщенная функциональная схема электромеханической системы ВЭУ



–1 – максимальная относительная мощность  $P^*$ ; –2 –  $P^*$  при  $\omega_{st} = 300$  об/мин; –3 –  $P^*$  при  $\omega_{st} = 400$  об/мин; –4 –  $P^*$  при  $\omega_{st} = 500$  об/мин; –5 –  $P^*$  при  $\omega_{st} = 600$  об/мин;

**Рис. 3.** Зависимость относительной максимальной мощности в функции относительной скорости ветрового потока

Конструкция ВЭУ АМ предполагает установку 3-х индукторных генераторов, работающих параллельно на промышленную сеть.

Исследования показали, что для согласования с сетью наиболее предпочтительным ПЧ является двухзвенный преобразователь со звеном постоянного напряжения. При этом возможно использование в качестве инверторов как АИН, так и ВСИ. Для обеспечения нормальной работы инверторов необходимо поддержание соответствия входного напряжения в звене постоянного напряжения  $U_d$  и сети  $U_s$ .

Поскольку ВЭУ АМ имеет 3 независимых генератора, то звено постоянного тока может быть обеспечено включением 3-х выпрямителей, соединенных параллельно или последовательно.

В установках ВЭУ ТГ-750 и ТГ-1000 используются генераторы на напряжение 0,4 и 0,69 кВ, соответственно, с последующим подключением их к сети высокого напряжения через трансформатор.

Исследования показали, что параллельное включение выпрямителей приводит к удорожанию вспомогательного ПЧ, т.к. при снижении оборотов снижается напряжение генератора, и требуется установка повышающего импульсного преобразователя (ИППН) [3]. В случае использования ВСИ без ИППН снижается коэффициент мощности  $K_m$  до  $0,4 \div 0,5$  [9], и, соответственно, увеличивается вдвое установленная мощность ВСИ.

Наиболее целесообразной является схема с последовательным соединением мостов (рис. 4). При снижении оборотов генератора в два раза, для получения необходимого напряжения  $U_d$  необходимо снижать ток возбуждения генератора, что в целом повышает КПД электро-

механической системы и ПЧ. Целесообразным является использование в ПЧ ВСИ, работающего по закону:

$$\Delta\beta = \text{const} = \beta_{\min} - \gamma, \quad (1)$$

где  $\Delta\beta$  – запас по времени восстановления тиристоров, асимметрии импульсов и напряжения;  $\beta_{\min}$  – минимальный угол опережения;  $\gamma$  – угол коммутации.

Для реальных параметров установок ТГ-750М и ТГ-1000 при  $\Delta\beta = 10$  эл. град, и  $\gamma \leq 3,0$  эл. град;  $P^* = 0,2$ ;  $\cos \varphi = 0,996$ ;  $K_m \approx 0,922$ , что незначительно отличается от требуемого значения 0,93 по ГОСТ 13109-97.

По числу контакторов схема рис. 4 эквивалентна схеме с параллельным включением выпрямителей [9], но имеет меньший расход активных материалов, а инвертор имеет вдвое меньшую установленную мощность ВСИ.

Для работы ВЭУ АМ в автономном режиме необходимо использование ПЧ с АИН. Наиболее рациональной была признана схема с трехуровневым инвертором и преобразователем ИППН [10, 11].

В обоих случаях использования ПЧ для обеспечения работоспособности ВЭУ АМ необходимо обеспечить постоянство оборотов генератора.

Отдельно необходимо остановиться на вопросе повышения мощности ВЭУ АМ.

Ранее было сказано о возможности непосредственной работы ВЭУ АМ на сеть 50 Гц. Однако с увеличением мощности увеличивается вес генераторов, что вызывает определенные трудности в обеспечении механической прочности лопастей и устранении колебаний ротора и, соответственно, мощности.

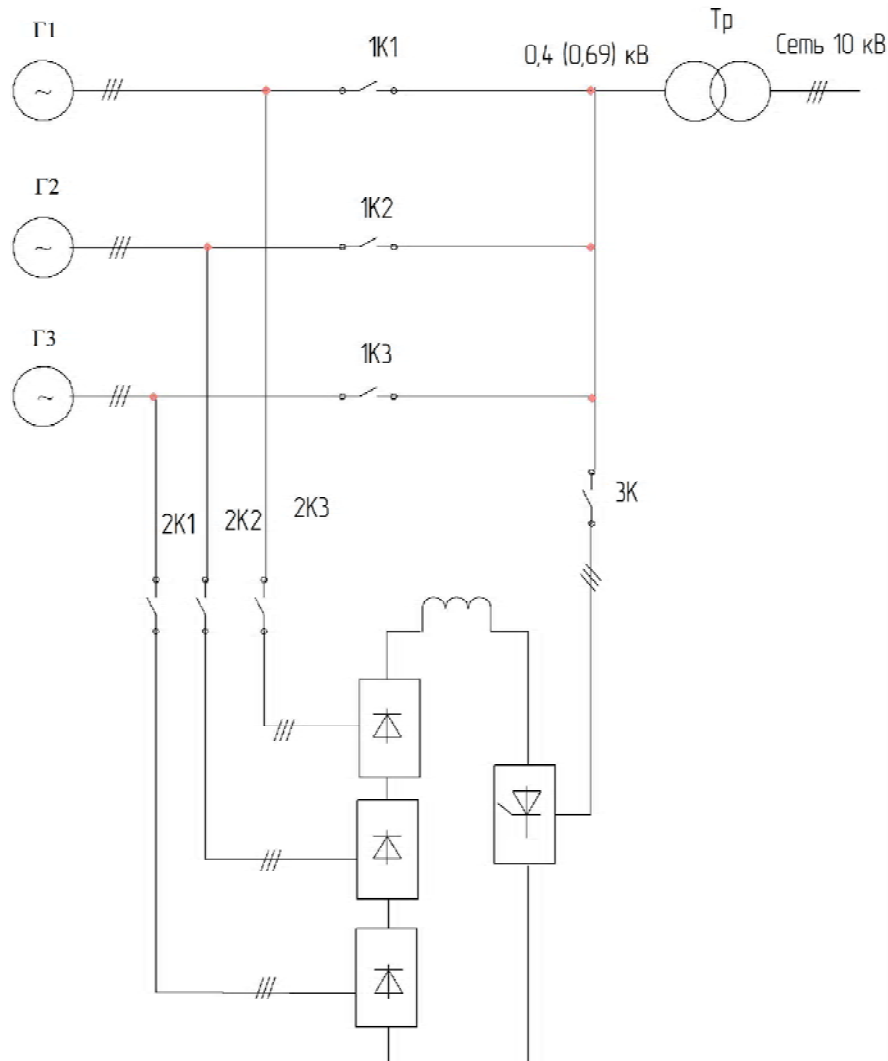


Рис. 4. Схема ПЧ с последовательным соединением выпрямителей и ВСИ

Проблему снижения массы индукторного генератора возможно решить увеличением частоты генератора и использованием совмещенных обмоток возбуждения и статора. В [12] было показано, что повышение частоты до 125 Гц позволяет снизить активную массу генератора СГИ-350-0,69 примерно вдвое при повышении КПД на 3,7%. Использование ПЧ для согласования генератора с сетью с КПД  $0,98 \div 0,99$  позволяет в целом увеличить КПД ВЭУ АМ на  $1,6 \div 2,7\%$ .

Помимо повышения частоты, снижение массы индукторного генератора возможно с использованием каскадных индукторных машин с совмещенными обмотками, а также синхронных генераторов с постоянными магнитами.

Таким образом, даже использование генераторов повышенной частоты практически без увеличения веса генератора позволяет получить мощность ВЭУ АМ в пределах 2000 кВт с более высоким КПД, чем генераторами на промышленной частоте. Дальнейшее повышение частоты до 400 Гц позволяет реализовать единичную мощность ВЭУ до 5–6 МВт.

Не менее важным является вопрос о выборе типа инвертора для мощной ВЭУ АМ.

Как правило, ВЭУ входят в состав ВЭС, которые подключаются к высоковольтной ЛЭП напряжением  $110 \div 350$  (750) кВ, обладающих высокой зарядной емкостью. Для компенсации этой емкости используются неуправляемые шунтирующие реакторы (ШР) мощностью 100180 МВАр и управляемые шунтирующие реакторы (УШР) мощностью 25 МВАр [13]. Наличие ШР и УШР играют решающую роль в компенсации зарядной мощности ЛЭП, снижении перенапряжений и токов подпитки при однофазных к.з. [13].

Наличие зарядной емкости в высоковольтной ЛЭП даже при отсутствии генерации реактивной мощности требует установки УШР, установленная мощность которых в зависимости от проектной мощности ЛЭП составляет  $19 \div 35\%$ . При мощности ЛЭП 200 МВт установленная мощность УШР составляет 3875 МВАр, т. е. 2–3 УШР на каждые 25 МВАр [13]. В этом случае использование ПЧ с ВСИ является отличной альтернативой ПЧ с АИН по следующим причинам:

– по принципу работы ВСИ является источником реактивной мощности, что позволяет исключить или существенно уменьшить мощность УШР;

– ВСИ имеет существенно меньшую себестоимость, отработанные технические решения, мощную производственную и элементную базу в Украине.

Поскольку последовательное соединение выпрямителей позволяет получить напряжение в звене постоянного тока на уровне  $2,5 \div 3$  кВ, это позволяет разместить основное оборудование в башне ВЭУ, что существенно снижает вес оборудования, установленного в гондоле.

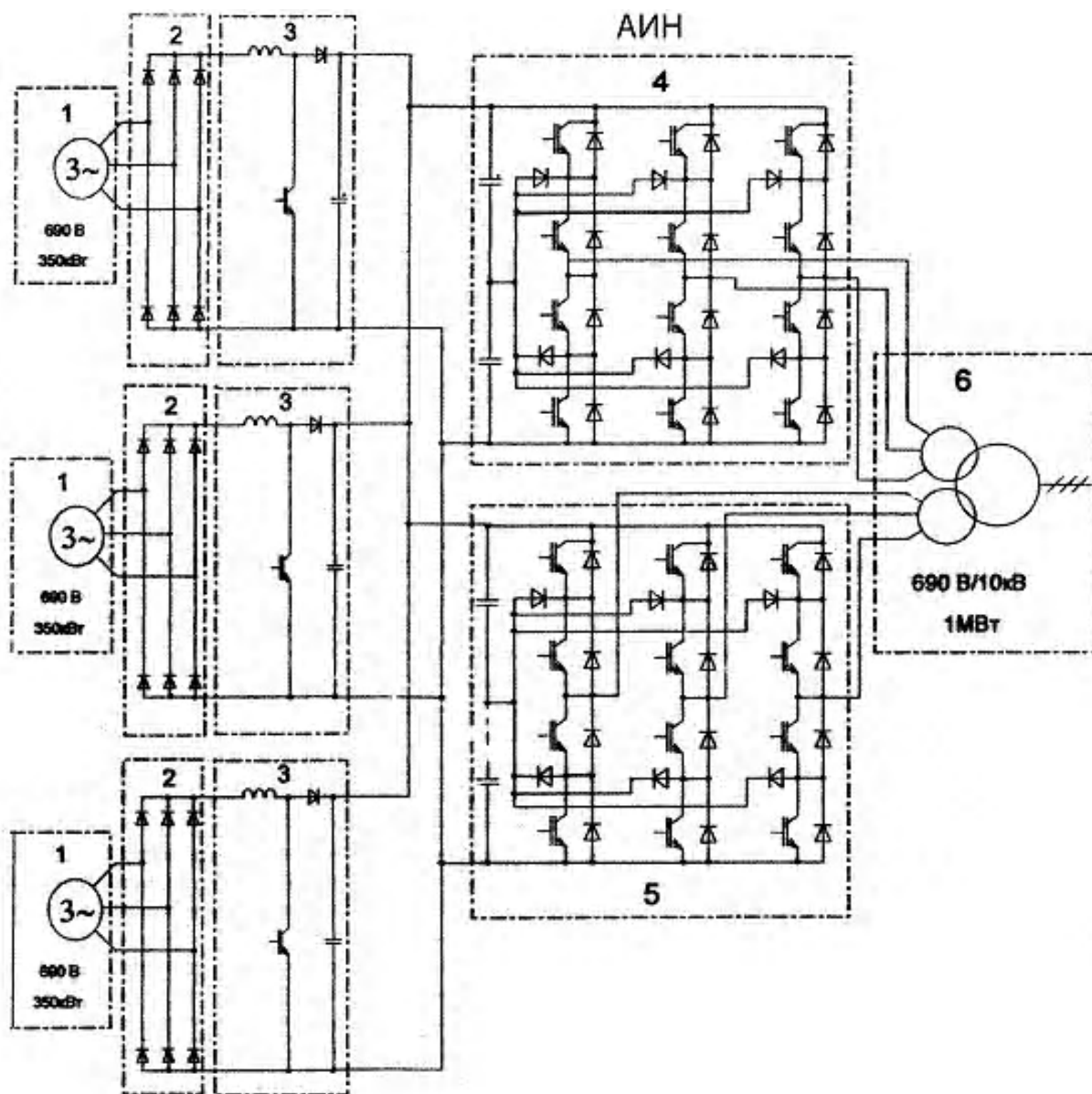
Наличие высокого напряжения  $U_d$  позволяет реализовать многофазные (12, 18, 24) схемы инвертирования, используя относительно низкие классы тиристоров (до 20). Выбор фазности схемы в зависимости от параметров сети и ВЭУ определяется из соотношения [14]

$$K_{ин} = \frac{P_{дн}}{S_{кз}} \sqrt{\frac{2\pi}{nmU_k} - 1}, \quad (2)$$

где  $K_{ин}$  – коэффициент искажения напряжения;  $P_{дн}$ ,  $S_{кз}$  – номинальная мощность ВЭУ и мощность к.з. системы;  $U_k$  – напряжение к.з. согласующего трансформатора.

Расчет показывает, что для ВЭУ АМ мощностью 2000 кВт возможно использовать 12-фазный инвертор при подключении к сети 35 кВ с  $P_{кз} = 1000$  МВА и  $U_k = 10\%$ . Для ВЭУ 3000 кВт и указанных условий необходим 18-фазный инвертор, для большей мощности – 24-фазный. При этом  $K_{ин} < 0,4$  будет находиться в пределах требуемых по ГОСТ 13190-97.

Для реализации автономного режима работы целесообразно использовать ПЧ с АИН. На рис. 5 представ-



1 – индукторный генератор; 2 – выпрямитель; 3 – ИППН; 4, 5 – трехуровневый инвертор; 6 – согласующий трансформатор.

Рис. 5. Упрощенная электрическая схема ПЧ ВЭУ АМ типа ТГ-1000

лена схема ПЧ с трехуровневым инвертором для ВЭУ АМ типа ТГ-1000 [11]. В данной схеме использовано параллельное включение выпрямителей с ИППН и два трехуровневых инвертора, выполненных на IGBT – модулях 17 класса.

В состав ПЧ входят 3 ИППН, позволяющих обеспечить соответствие входного напряжения инвертора сетевому.

Наличие ИППН вызывает определенные требования к внутреннему сопротивлению цепей от генератора до ИППН, которое определяется из его регулировочной характеристики:

$$U_{d^*} = K - K^2 \cdot R_3^* , \quad (3)$$

где  $U_{d^*} = U_d / E_r$ ;  $K = 1 / (1 - K_c)$ ;  $R_3 = R_3 / R_{нагр}$ ;  $R_{нагр} = E_{d0} / I_n$ ;  $U_d, E_r, E_{d0}$  – напряжения в звене постоянного тока, ЭДС генератора и ЭДС инвертора соответственно;  $K_c$  – коэффициент скважности;  $R_3$  – эквивалентное сопротивление цепи генератор – ИППН;  $R_{нагр}$  – сопротивление нагрузки ВЭУ АМ;  $I_n$  – номинальный ток инвертора.

Из (3) следует, что максимальное напряжение  $U_{d^*}$  определяется соотношением:

$$U_{d^* \max} = 1 / 4R_3^* \quad (4)$$

при коэффициенте скважности  $K_{с \max} = 1 - 2R^*$ .

Наличие ИППН также необходимо и в случае использования ВСИ, в котором он выполняет следующие функции:

– поддержание величины  $U_{d0}$ , обеспечивающей работу ВСИ с  $\beta_{\min}$ , в том числе и при колебаниях напряжения сети;

– возможность изменения величины генерируемой реактивной мощности для компенсации зарядной мощности ЛЭП.

## ВЫВОДЫ

Рассмотренные в статье технические решения показывают возможность существенного повышения эффективности преобразования энергии, а также возможность повышения единичной мощности ВЭУ АМ.

Показано, что использование вспомогательных преобразователей частоты мощностью до 20 % от номинальной позволяет существенно повысить выработку электроэнергии на 3 ÷ 10 % при скорости ветрового потока  $\leq 5$  м/с.

Установлено, что использование многофазных ВСИ позволяет существенно снизить себестоимость мощных ветроэлектростанций, подключаемых к линии электропередачи высокого напряжения более 100 кВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нойбергер Н. Состояние и перспективы развития ветроэнергетики / Н. Нойбергер, О. Нолле, Г. Г. Пивняк // Электротехнические и компьютерные системы. – 2010. – №3 (79). – С. 362–364.
2. Molly P. Status der Windenergie in Deutschland – Stand 31.12.2010
3. Schreiber D. Power Electronics for wind mill application / Schreiber D. // Wind power. – Asia. – 2007. – С. 15–16.
4. Application Manuel Power Modules // Semikron International – 2009.
5. Цгоев Р. С. Сравнение режимных возможностей ветроэнергетических установок / Цгоев Р. С. // Электротехника. – 2007. – №12. – С. 32–38.
6. Голубенко Н. С. Тенденции развития ветроэнергетики и безмультипликаторные ветровые установки / [Голубенко Н. С., Довгалюк С. М., Фельдман А. М., Цыганов В. А.] // Материалы IV международной конференции [«Нетрадиционная энергетика XXI века»]. – Крым, Гурзуф. – 2003. – С. 68–74.
7. Голубенко Н. С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэнергетической установки большой мощности / Голубенко Н. С. // Материалы IV международной конференции [«Нетрадиционная энергетика XXI века»]. – Крым, Гурзуф. – 2003. – С. 125–132.
8. Голубенко Н. С. Моделирование электромеханической системы ВЭУ с аэродинамической мультипликацией в режиме стабилизации скорости ветротурбин / [Голубенко Н. С., Алексеевский Д. Г., Андриенко П. Д., Немудрый И. Ю.] // Электротехника и электроэнергетика. – 2011. – № 1. – С. 70–74.
9. Андриенко П. Д. Повышение эффективности ветроэнергетической установки ТГ-750 / Андриенко П. Д., Немудрый И. Ю., Метельский В. П., Никонова А. Л. / Вестник СевНТУ «Механика, энергетика, экология». – 2011. – Вып. 119. – С. 109–112.
10. Андриенко П. Д. Схема преобразования энергии в ветроэнергетических установках с аэродинамической мультипликацией / Андриенко П. Д., Метельский В. П., Немудрый И. Ю. // «Электромеханические и энергосберегающие системы». – Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – 2012. – № 3 (15). – С. 612–614.
11. Андриенко П. Д. Реализация автономного режима работы ветроэнергетической установки типа ТГ-1000 / Андриенко П. Д., Кражан В. С., Немудрый И. Ю., Шавелкин А. А. // Вісник національного технічного університету ХПІ. – Харків НТУ ХПІ. – 2000. – № 28. – С. 343.

12. Андриенко П.Д. Использование высокочастотных генераторов для повышения мощности ВЭУ с аэродинамической мультипликацией / Андриенко П.Д., Мельский В.П., Немудрый И.Ю. // Электромеханические и компьютерные системы. – 2013. – №10 (86). – С. 45–49.
13. Дементьев Ю. А. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях / Дементьев Ю. А., Кочкин В. И., Мельников А. Г. // Электричество. – 2003. – № 9. – С. 2–10.
14. Шипилло В. П. Влияние тиристорного электропривода на питающую сеть / Шипилло В.П. // Электротехническая промышленность. Серия «Электропривод». – 1970. – Вып 1. – С. 17–21.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2014.  
Після доробки 22.06.2014.

Немудрый И. Ю.

Аспірант, Запорізький національний технічний університет, Україна

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВКАХ З АЕРОДИНАМІЧНОЮ МУЛЬТИПЛІКАЦІЄЮ**

*В статті розглянуті напрями підвищення ефективності принципово нової схеми вітроелектричних установок (ВЕУ) з аеродинамічною мультиплікацією (АМ), що забезпечують роботу з мережею без перетворювачів частоти при змінних обертах вітроколеса.*

*Для підвищення одиначної потужності ВЕУ АМ більш ніж 1000 кВт можливе використання високочастотних генераторів з суміщеними обмотками.*

*Розглянуті можливості використання в перетворювачах частоти інверторів керованих мережею (КМІ) з перетворювачами підвищення напруги ф автономних інверторів.*

*Для забезпечення електромагнітної суміщності з мережею наведені рекомендації по вибору схем перетворювачів частоти.*

**Ключові слова:** вітроелектрична установка, аеродинамічна мультиплікація, перетворювач частоти, інвертор керований мережею, автономний інвертор, ефективність, електромагнітна суміщність.

Nemudry I. Y.

Postgraduate, Zaporozhzhie National Technical University, Ukraine

**IMPROVEMENT OF THE ENERGY CONVERSION EFFICIENCY IN WIND POWER EQUIPMENT WITH AN AERODYNAMIC ANIMATION**

*In the article the directions of the efficiency increase of the fundamentally new scheme of wind power equipment with an aerodynamic animation (WPE AAS) are reviewed, this scheme provides operation with network without frequency converters at variable speed wind turbine.*

*On simulation models, the dependences of the energy produced at different speeds of wind turbines depending on the speed of the wind flow are given.*

*It is shown that the use of auxiliary frequency converters with power up to 20 % of nominal allows to increase electricity production by 3 % to 10 % at the speed of the wind flow  $\leq 5$  m/S and by reducing the speed of the wind turbine in 2 times.*

*High efficiency is provided by series connection of the rectifier and the adjustment of excitation current of the generator.*

*For increasing the unit capacity of wind turbines WPE Aa to more than 1000 kW it is possible to use high-frequency inductor generators with a combined windings.*

*It is shown that the frequency of the generator 125 Hz approximately twice reduced the weight of the generator when saving power. The complex generator – FC provides increased efficiency by 1,6 % and 2,7 %.*

*The possibilities of inverters slave network (ISN) use in frequency converter with boost converters of voltage and standalone inverters are presented.*

*The developed recommendations on determination of the Converter parameters increase tension and requirements for internal resistance of the generator and power cables.*

*It is established that the use of multiphase ISN can significantly reduce the cost of powerful wind farms connected to the transmission line high voltage over 100 kV by reducing the installed power of shunt reactors.*

*To ensure electromagnetic compatibility with the network the guidance on the choice of schemes of multiphase frequency converters with ISN is given.*

**Keywords:** wind power equipment, a wind animation, frequency converter, slave network inverter, standalone inverter, efficiency, electromagnetic compatibility.



## REFERENCES

1. Noyberher N., Nolle O., Pyvnyak H. H. Sostoyanye y perspektyvi rozvytyya vetroenerhetyky, *Elektrotekhnicheskyye y kompyuternyye systemy*, 2010, No. 3 (79), pp. 362–364.
2. Molly P. Status der Winderner gienutrung in Deutschland – Stand 31.12.2010
3. Schreiber D. Power Electronics for wind mill application, *Wind power. Asia*, 2007, pp. 15–16
4. Application Manuel Power Modules, Semikron International, 2009.
5. Tshoev R. S. Sravnenye rezhymnikh vozmozhnostey vetroenerhetycheskykh ustanovok, *Elektrotekhnika*, 2007, No. 12, pp. 32–38.
6. Holubenko N. S., Dovhalyuk S. M., Feldman A. M., Tsihanov V. A. Tendentsyy rozvytyya vetroenerhetyky y bezmulyplykatornyye vetrovyye ustanovky, *Materyali IV mezhdunarodnoy konferentsyy [«Netradytsyonnaya enerhetyka XXI veka»]*, Krim, Hurzuf, 2003, pp. 68–74.
7. Holubenko N.S. Aerodynamycheskyye osobennosti bezmulyplykatornoy turbogeneratornoy skhemi vetroenerhetycheskoy ustanovky bolshoy moshchnosti, *Materyali IV mezhdunarodnoy konferentsyy [«Netradytsyonnaya enerhetyka XXI veka»]*, Krim, Hurzuf, 2003, pp. 125–132.
8. Holubenko N. S., Alekseevskyy D. H., Andryenko P. D., Nemudriy Y. Yu. Modelyrovanye elektromekhanicheskoy systemy VEU s aerodynamycheskoy mulyplykatsyyey v rezhyme stablyzatsyy skorosty vetroturbyn, *Elektrotekhnika y elektroenerhetyka*, 2011, No. 1, pp. 70–74
9. Andryenko P. D., Nemudriy Y. Yu., Metelskyy V. P., Nykonova A. L. Povishenyye efektyvnosty vetroenerhetycheskoy ustanovky TH-750, *Vestnyk SevNTU «Mekhanika, enerhetyka, ekolohyya»*, 2011, vep. 119, pp. 109–112.
10. Andryenko P. D., Metelskyy V. P., Nemudriy Y. Yu. Skhema preobrazovanyya enerhyy v vetroenerhetycheskykh ustanovkakh s aerodynamycheskoy mulyplykatsyyey, «Elektromekhanicheskyye y enerhosberehayushchyy systemy», *Tematycheskyy vipusk «Problemy avtomatyzyrovannoho elektropryvoda. Teoryya y praktyka»*, 2012, No. 3 (15), pp. 612–614.
11. Andryenko P. D., Krazhan V. S., Nemudriy Y. Yu., Shavelkyn A. A. Realyzatsyya avtonomnoho rezhyma raboty vetroenerhetycheskoy ustanovky typu TH-1000, *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI. Kharkiv NTU KhPI*, 2000, No. 28, pp. 343.
12. Andryenko P. D., Metelskyy V. P., Nemudriy Y. Yu. Yspolzovanye vusokochastotnykh heneratorov dlya povyshenyya moshchnosti VEU s aerodynamycheskoy mulyplykatsyyey, *Elektromekhanicheskyye y kompyuternyye systemy*, 2013, No. 10 (86), pp. 45–49.
13. Dementev Yu. A., Kochkyn V. Y., Me'nykov A. H. Prymenenyye upravlyaemikh statycheskykh kompensyruyushchykh ustroystv v elektrycheskykh setyakh, *Elektrychestvo*, 2003, No. 9, pp. 2–10.
14. Shypyllo V. P. Vlyyanye tyrstornoho ylekthropryvoda na pytayushchuyu set, *Elektrotekhnicheskaya promishlennost. Seryya «Elektropryvod»*, 1970, vip 1, pp. 17–21.