

УДК 621.314.21

Д.М. Кочеганов¹, А.С. Стеклов², А.В. Серебряков³

СТРУКТУРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ВЕТРО-ДИЗЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

¹ Инжиниринговая компания «АСЭ»² Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова
³ ООО «АСМ НН»

Рассмотрены существующие автономные ветроэнергетические установки; определены их недостатки. Предложена структура ветроэнергетической установки, обеспечивающей повышение ее энергоэффективности. Приведена функциональная схема автономной ветроэнергетической установки; описан принцип ее работы. Эффект от применения предложенной структуры ветроэнергетической установки заключается в возможности отбора максимальной мощности с ветроколеса, параллельной работы каналов преобразования энергии от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и ветроколеса с распределением нагрузки между ними и выборе оптимальной скорости вращения ДВС, что соответствует оптимальному расходу топлива ДВС.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система, ветроэнергетическая установка, ветро-дизель энергетическая установка, генераторный комплекс, электроснабжение, энергоэффективность.

1. Введение

Стремительное развитие новой аппаратной базы электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники стимулирует разработчиков на создание высокотехнологичных, энергоэффективных, надежных и быстро окупаемых ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1]. Сегодня к возобновляемым автономным источникам энергии (АИЭ) на базе ВЭУ предъявляются все более высокие требования по обеспечению надежности и энергоэффективности работы [2]. Типовые решения систем электроснабжения (СЭС) с ВЭУ реализуют только частные задачи, не обеспечивая комплекса проблем создания конкурентоспособных интеллектуальных источников электроснабжения (ИИЭ) на основе принципов активно-адаптивных «разумных» электросетей Smart Grid [3, 4]. Принятые в последнее время нормативные акты РФ стимулируют поиск инновационных энергосберегающих технологий СЭС на базе ВЭУ для объектов и потребителей различных отраслей.

Существующие автономные ВЭУ, вырабатывающие электроэнергию переменного напряжения стабилизированной частоты и амплитуды, имеют ряд недостатков [5, 6]:

- ограниченный диапазон скоростей ветрового потока, при котором возможен отбор мощности с ветроколеса (ВК);
- отсутствие параллельной работы источников электроэнергии (аккумуляторной батареи и генераторов переменного напряжения (ГПН), приводимых во вращение ВК и двигателем внутреннего сгорания (ДВС) с распределением общей нагрузки между ними;
- повышенный расход топлива (низкий КПД) ДВС, связанный с постоянной скоростью вращения его вала при меняющейся мощности нагрузки.

II. Структура энергоэффективной ВЭУ

Авторами предлагается структура ВЭУ с двумя каналами генерирования электроэнергии [7-12], каналом накопления энергии, выходным каналом, позволяющая устранить вышеуказанные недостатки и повысить энергоэффективность ВЭУ (рис. 1).

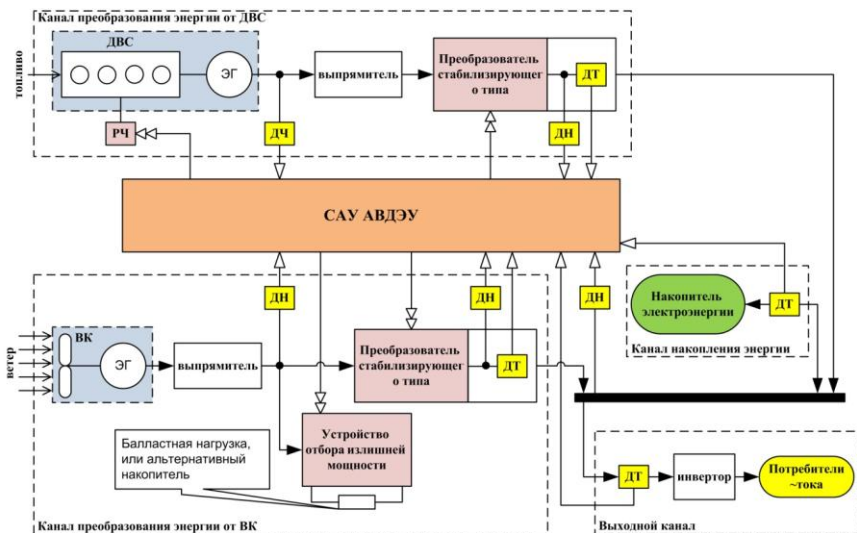


Рис. 1. Структура ВЭУ:

ДЧ – датчик частоты выходного напряжения; РЧ – регулятор частоты вращения;
ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Одни из каналов генерирования электроэнергии – канал преобразования энергии от ветроколеса, содержащий последовательно соединенные

элементы: ветроколесо, ГПН, неуправляемый выпрямитель, преобразователь стабилизирующего типа. Указанный канал имеет ответвление от выпрямителя в виде последовательного соединения устройства отбора излишней мощности, а также балластной нагрузки либо альтернативного накопителя. Второй канал генерирования электроэнергии – канал преобразования энергии от ДВС, содержащий последовательно соединенные элементы: ДВС с регулятором скорости вращения, ГПН, неуправляемый выпрямитель, преобразователь стабилизирующего типа. Канал накопителя энергии включает в себя непосредственно сами накопители [12]. Три данных канала подключены на шину стабилизированного постоянного напряжения, к которой подключен выходной канал, состоящий из инвертора и выводных зажимов, для подключения потребителей (нагрузки) на переменное напряжение стабилизированной частоты и амплитуды [13]. В предложенной авторами ВЭУ осуществляется отбор максимальной мощности с ветроколеса при каждом значении скорости ветрового потока. Это происходит за счет использования преобразователей стабилизирующего типа и устройства отбора излишней мощности, управление которыми осуществляет система автоматического управления (САУ). При этом обеспечивается аккумулирование энергии в накопителе, преобразование в полезную работу в балластной нагрузке или преобразование в другой вид энергии в альтернативном накопителе. В дальнейшем эта энергия может быть использована для выполнения полезной работы [14, 15]. За счет использования преобразователей стабилизирующего типа, управление которыми осуществляет САУ, обеспечивается параллельная работа каналов преобразования энергии от ДВС и ветроколеса с распределением нагрузки между ними. САУ, посредством преобразователей стабилизирующего типа, обеспечивает отбор максимальной мощности с вала ветроколеса, указанный в первом аспекте. САУ также регулирует потребляемую мощность с ДВС при мощности нагрузки, превышающей мощность канала преобразования энергии от ветроколеса (при данной скорости ветра), но меньшей суммарной мощности канала преобразования энергии от ветроколеса (при данной скорости ветра) и канала преобразования энергии от ДВС (при номинальной мощности ДВС). За счет использования преобразователей стабилизирующего типа и регулятора скорости вращения ДВС, управление которыми осуществляет САУ, обеспечивается выбор оптимальной скорости вращения ДВС, в зависимости от потребляемой мощности нагрузкой от ДВС. Задание САУ оптимальной скорости, посредством регулятора скорости вращения ДВС, соответствует оптимальному расходу топлива ДВС [16, 17].

III. Функциональная схема энергоэффективной ВЭУ

Функциональная схема энергоэффективной ВЭУ приведена на рис. 2. Канал 27 преобразования энергии от ветроколеса 6 состоит непосредственно из самого ветроколеса 6, ГПН 7, приводимого во вращение ветроколесом 6, неуправляемого выпрямителя 8, установленного на выходе ГПН 7, преобразователя напряжения стабилизирующего типа 9, подключенного к выходу выпрямителя 8. К выходу неуправляемого выпрямителя 8 также подключен блок отбора излишней мощности 10, к выводам которого подключена балластная нагрузка или альтернативный накопитель энергии 11. Данный канал также снабжен датчиками выходного тока 21 и напряжения 22 преобразователя стабилизирующего типа 9. На выход выпрямителя 8 установлен датчик напряжения 20.

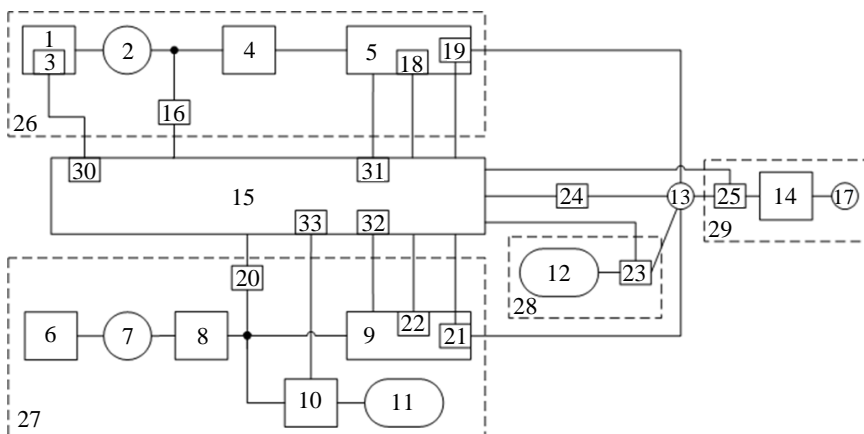


Рис. 2. Функциональная схема ветроэнергетической установки

Канал 26 преобразования энергии от ДВС 1 состоит непосредственно из самого ДВС 1, снабженного регулятором скорости вращения 3 ДВС 1, ГПН 2, приводимого во вращение ДВС 1, неуправляемого выпрямителя 4, установленного на выходе ГПН 2, преобразователя напряжения стабилизирующего типа 5, подключенного к выходу выпрямителя 4. Данный канал также снабжен датчиком скорости вращения 16 ДВС 1, датчиками выходного тока 19 и напряжения 18 преобразователя стабилизирующего типа 5 ДВС 1.

Канал 28 накопителя энергии 12 включает в себя непосредственно сами накопители 12, к примеру, аккумуляторные батареи. Данный канал также снабжен датчиками тока 23 накопителей энергии 12.

Три рассмотренных канала подключены на шину стабилизированного постоянного напряжения 13, снабженной датчиком напряжения 24, к которой подключен выходной канал 29, состоящий из инвертора 14, датчика тока нагрузки 25 и выводных зажимов 17, для подключения потребителей (нагрузки) на переменное напряжение стабилизированной частоты и амплитуды.

САУ 15 представлена в микропроцессорном варианте, к соответствующим ее входам подключены выходы указанных датчиков. Данная система на первом выходе 30, подключенном к регулятору скорости вращения 3 ДВС 1, формирует управляющие сигналы задания скорости вращения ДВС 1. На втором 31 и третьем 32 выходах САУ 15, подключенных к преобразователям стабилизирующего типа 5 и 9, установленных в каналах преобразования энергии от ДВС 1 и ветроколеса 6 соответственно, формируются управляющие сигналы. Они обеспечивают максимальный отбор мощности от ГПН 7 ветроколеса 6 и компенсационный отбор мощности от ГПН 2 ДВС 1, параллельную работу каналов отбора энергии от ДВС 1 и ветроколеса 6, а также распределение нагрузки между ними. На четвертом 33 выходе САУ 15, подключенном к блоку отбора излишней мощности 10, формируется сигнал в функции выходного напряжения выпрямителя 8, обеспечивающий посредством этого блока прогрузку генератора 7 на балластную нагрузку и/или альтернативный накопитель 11.

Устройство работает следующим образом: воздушный поток вращает ветроколесо 6, которое приводит во вращение ГПН 7. Напряжение переменной частоты и амплитуды с выхода генератора 7 подается на неуправляемый выпрямитель 8, посредством которого преобразуется в постоянное напряжение с плавающим уровнем амплитуды. Информация об уровне выходного напряжения выпрямителя 8 поступает в САУ 15 от датчика напряжения 20. Часть мощности, выработанной генератором 7, (либо вся мощность в случае, если устройство отбора излишней мощности 10 выведено САУ 15 из действия) передается дальше в канал 27 преобразования энергии от ветроколеса 6, а именно – на преобразователь стабилизирующего типа 9. Управление стабилизатором осуществляется по каналу 32 от САУ 15. САУ, в соответствии с параметрами, полученными с датчиков напряжения и тока 18-25, воздействует на преобразователь 9, обеспечивая стабилизацию напряжения на заданном уровне и регулирование потока энергии на выходе канала 27 преобразования энергии от ветроколеса 6 (на выходе преобразователя 9).

Часть мощности (излишек мощности), которая не потребляется нагрузкой с ВГ 7, уходит в устройство отбора излишней мощности 10, подключенное к выходу выпрямителя 8. К выводам данного устройства подключена балластная нагрузка и/или альтернативный накопитель энергии

11. На балластной нагрузке 11 (ей может быть, к примеру, нагревательный элемент) тратится излишняя мощность, совершая работу. Альтернативный накопитель 11 аккумулирует избыток энергии, который поступает от ветроколеса 6. Управление устройством отбора излишней мощности 10 осуществляется по каналу 33 от САУ 15. В канале управления устройством отбора излишней мощности 33 управляющий сигнал 10 формируется по разностной функции сигнала с датчика напряжения 20 на выходе выпрямителя 8 и задания по напряжению. Устройство отбора излишней мощности 10 получает энергию от выпрямителя 8 в том случае, когда напряжение на входе выпрямителя 8 больше заданного значения. Во всех остальных случаях устройство отбора излишней мощности выведено из канала преобразования энергии 27 от ветроколеса 6 (отключено по входу посредством САУ 15).

В данном устройстве функция отбора максимальной мощности с ветроколеса 6 при данной скорости ветра реализуется САУ 15, которая в соответствии с заложенным алгоритмом управляет устройством отбора излишней мощности 10. Эта функция реализуется за счет увеличения отбираемой мощности с ГПН 7 до того момента, пока отбираемая мощность не достигнет возможного максимума при данной скорости потока ветра. Далее САУ 15, посредством канала управления 33, устанавливает это максимальное состояние. Оценка максимума выходной мощности генератора производится по приращению сигнала с датчика напряжения 20 на выходе выпрямителя 8. В случае положительного приращения, САУ 15 увеличивает значение отбираемой мощности, увеличивая поток энергии в устройство отбора излишней мощности 10, тем самым сводя приращение к нулю. В случае отрицательного значения приращения производится поиск максимума выходной мощности с ГПН 7 (выпрямителя 8) между предпоследним и последним значением. Таким образом, устройство отбора излишней мощности 10 выполняет две важные функции: осуществляет ограничение амплитуды напряжения на выходе ГПН 7 для защиты входных цепей преобразователя стабилизирующего типа 9, посредством прогрузки на балластную нагрузку или альтернативный накопитель 11. Следствием этого является получение максимальной мощности на выходе ГПН 7. Функция прогрузки ГПН 7 ветроколеса 6 посредством устройства отбора излишней мощности 10 возможна только в режиме превышения возможной максимальной мощности (которая может быть снята с ГПН 7 ветроколеса 6), по сравнению с потребляемой мощностью. Если потребляемая нагрузкой мощность превышает мощность, вырабатываемую ГПН 7 ветроколеса 6, САУ 15 вводит в работу канал 26 преобразования энергии от ДВС 1. САУ 15 в данном режиме обеспечивает отбор максимально возможной мощности с вала ветроколеса 6 при данной скорости ветра. Кроме того, осуществляет-

ся компенсация недостающей мощности с канала 26 преобразования энергии от ДВС 1. Это реализуется посредством включения на параллельную работу преобразователей стабилизирующего типа 5 и 9 каналов 26 и 27 соответственно, с распределением нагрузки между ними.

ДВС 1 приводит во вращение ГПН 2, к выводам которого подключен неуправляемый выпрямитель 4. Установка оптимальной частоты вращения вала ДВС 1, определенной потребляемой мощностью нагрузкой от ДВС 1, осуществляется посредством регулятора скорости вращения 3 ДВС 1. Управление им осуществляется по каналу от САУ 15. САУ по сигналам, полученным от датчиков напряжения 18 и тока 19, установленным на выходе преобразователя стабилизирующего типа 5, вычисляет потребляемую мощность нагрузкой от ДВС 1. В зависимости от потребляемой мощности нагрузкой от ДВС 1 и в соответствии с алгоритмом управления, в который заложены оптимальные зависимости скорости вращения ДВС 1 от мощности нагрузки ДВС 1, соответствующие минимальному расходу топлива, производится вычисление оптимальной скорости вращения ДВС 1. Далее находится разность между оптимальной и текущей скоростями вращения вала ДВС 1. Текущее значение скорости вращения вала ДВС 1 поступает в САУ от датчика скорости вращения 16 ДВС 1. Разностное значение преобразуется в управляющий сигнал, который подается САУ 15 на вход регулятора скорости вращения 3 ДВС 1, поддерживая тем самым частоту вращения вала ДВС 1 на оптимальном уровне, соответствующем минимальному потреблению топлива.

Поскольку скорость вращения вала ДВС 1 будет изменяться в зависимости от мощности нагрузки, то амплитуда и частота переменного напряжения ГПН 2 будет также изменяться в зависимости от мощности нагрузки ДВС 1. Выходное напряжение ГПН 2 переменной частоты и амплитуды посредством неуправляемого выпрямителя 4 преобразуется в постоянное напряжение с плавающим уровнем (амплитудой).

Роль регулятора потока мощности в канале 26 преобразования энергии от ДВС 1 выполняет преобразователь стабилизирующего типа 5, подключенный к выходам выпрямителя 4. Управление стабилизатором 5 осуществляется по каналу от САУ 15. САУ, в соответствии с параметрами, снятыми с датчиков напряжения и тока 18-25, оказывается воздействие на преобразователь 5, тем самым обеспечивая стабилизацию напряжения на заданном уровне и регулирование потока энергии на выходе канала ДВС (на выходе преобразователя 5). Ряд элементов, а именно: преобразователи стабилизирующего типа 9 и 5 канала преобразования энергии 27 от ветроколеса 6, канала 26 преобразования энергии от ДВС 1, накопители энергии 12, – подключен на шину стабилизированного постоянного напряжения 13. Накопители энергии 12 в данной системе играют роли резервного ис-

точника, а также демпфера. Накапливая энергию от источников 1-2, 6-7 и отдавая ее потребителю, они компенсируют скачки (пики, провалы) энергии, вызванные либо приложением/снятием нагрузки потребителей, либо выводом из действия одного из генерирующих элементов комплекса (выводом 1-2 либо 6-7). Таким образом, источники, оставшиеся в работе, как и нагрузка, частично либо полностью разгружаются от скачков энергии. Это облегчает процесс поддержания требуемых значений параметров напряжения, позволяет стабилизировать скорость вращения ДВС 1 и/или ветроколеса 6 при изменении нагрузки, а также позволяет демпфировать процесс вывод из действия одного из генерирующих элементов. Таким образом, обеспечивается экономия топлива ДВС 1, поскольку исключается «перегазовка» его, а также уменьшается вероятность останова ветроколеса 6. Информация о напряжении и токе в САУ 15 от накопителей энергии 12 поступает от датчика напряжения 24, шины стабилизированного постоянного напряжения 13 и датчика тока 23 в канале накопителей энергии 12. Распределение нагрузки между каналами выполняет САУ 15.

Для преобразования постоянного стабилизированного напряжения в переменное напряжение фиксированной частоты и амплитуды к шине стабилизированного постоянного напряжения 13 подключен инвертор напряжения 14. Нагрузка подключается к выводным зажимам 17 автономной электроэнергетической системы.

IV. Заключение

Предложенная авторами структура позволяет повысить энергоэффективность ВЭУ и обеспечивает:

- отбор максимальной мощности с ветроколеса при каждом значении скорости ветрового потока;
- параллельную работу каналов преобразования энергии от ДВС и ветроколеса с распределением нагрузки между ними;
- выбор оптимальной скорости вращения ДВС в зависимости от потребляемой мощности нагрузкой от ДВС, что соответствует оптимальному расходу топлива ДВС.

© Кочеганов Д.М., 2019

© Стеклов А.С., 2019

© Серебряков А.В., 2019

Библиографический список

- [1] Patel M.R. Shipboard electrical power systems. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. – 370 p.
- [2] Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В., Плехов А.С. АСУ систем электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности. 2012. № 4. С. 36-38.

- [3] Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. № 4 (29). С. 35-38.
- [4] Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Храмшин В.Р. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 129-136.
- [5] Серебряков А.В. Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2013. № 3. С. 39-46.
- [6] Серебряков А.В., Титов В.Г., Чернов Е.А., Шахов А.В. Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2015. № 2 (109). С. 203-209.
- [7] Thorsen V., Dalva M. Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry // *8th IEEE Int. Conf., EMD'97*. 1997. № 444. Pp. 109-113.
- [8] Thomson W.T., Rankin D. Case histories of rotor winding fault diagnosis in induction motors // *2nd Int. Conf. Proc. on Condition Monitoring*, March 1987.
- [9] Kliman G.B., Stein J. Induction motor fault detection via passive current monitoring // *Int. Conf. ICEM '90*, 1990, Boston, USA. P. 13-17.
- [10] Thomson W.T., Chalmers S.J., Rankin D. On-line current monitoring and fault diagnosis in high voltage induction motors – case histories and cost savings in offshore installations // *Offshore Europe '87*, Sept. 1987, Aberdeen, UK, SPE-16577-MS.
- [11] Schoen R.R., Habetler T.G., Kamran F. Motor bearing damage detection using stator current monitoring // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995. № 31 (6). P. 1274-1279.
- [12] Thomson W.T., Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults // *IEEE Industry Application Magazine*. 2001. № 7 (4). P. 26-34.
- [13] Thomson W.T. A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors – past present and future // *IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, 1999, P. 3-18.
- [14] Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. № 3 (19). С. 549-552.
- [15] Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей // *Вестник Чувашского университета*. 2016. № 1. С. 97-104.
- [16] Стеклов А.С. Нейронечёткое моделирование степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 3. С. 39-43.

- [17] Серебряков А.В., Стеклов А.С., Титов В.Г. Новый алгоритм технического диагностирования гребных электродвигателей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2017. Т.17. № 2. С. 82-88.

D.M. Kocheganov¹, A.S. Steklov², A.V. Serebryakov³

STRUCTURE OF ENERGY-EFFICIENT WIND-DIESEL POWER PLANT WITH VARIABLE ROTATION SPEED

¹ Engineering company ASE
Nizhny Novgorod, Russia

² Experimental design Bureau of mechanical engineering n.a. I.I. Afrikantov
Nizhny Novgorod, Russia

³ JSC «Architectural and Construction Workshop – NN»
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The existing autonomous wind power plants are considered. Their shortcomings are defined. A structure of wind power plant, which provides an increase in its energy efficiency is proposed. A functional diagram of an autonomous wind power plant is presented. The principle of its operation is described. The effect of the proposed structure of wind power plant was expressed in the possibility of selecting the maximum power from the wind wheel, parallel operation of the energy conversion channels from the engine and the wind wheel with the load distribution between them and choosing the optimal speed of rotation of the engine, which corresponds to the optimal fuel consumption of the engine.

Keywords: autonomous electric power system, energy efficiency, generator, power supply, wind power plant, wind-diesel power plant.

References

- [18] M.R. Patel, *Shipboard Electrical Power Systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [19] A.B. Vasenin, O.V. Krukov, A.V. Serebryakov and A.S. Plekhov, «Automated controls for power supply systems of gas mains' facilities based on Smart Grid concepts», *Automation in Industry*, vol. 4, pp. 36-38, Apr. 2012.
- [20] O.V. Krukov and A.V. Serebryakov, «Method and system of decision making of technical state forecast of electric gas compressor units», *Electrotechnical Systems and Complexes*, vol. 4, no. 29, pp. 35-38, 2015.
- [21] S.I. Lukjanov, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, A.S. Sarvarov, M.Yu. Petushkov and V.R. Khrumshin, «The development and implementation of intelligent systems for electrical equipment state diagnostics», *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, vol. 1, no. 45, pp. 129-136, 2014.
- [22] A.V. Serebryakov, «Optimization of diagnostics of electromechanical part of windpower installations», *Electrical equipment: operation and repair*, vol. 3, pp. 39-46, March 2013.

- [23] A.V. Serebryakov, V.G. Titov, E.A. Chernov and A.V. Shakhov, «Differentiation loads in power systems autonomous consumers», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, vol. 2, no. 109, pp. 203-209, 2015.
- [24] V. Thorsen and M. Dalva, «Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry», in proc. *8th IEEE Int. conf. EMD'97, University of Cambridge*, no. 444, pp. 109-113, 1997.
- [25] W.T. Thomson and D. Rankin, «Case histories of rotor winding fault diagnosis in induction motors», in proc. *2nd Int. Conf. Proc. on Condition Monitoring*, University College Swansea, Swansea, UK, March 1987.
- [26] G.B. Kliman and J. Stein, «Induction motor fault detection via passive current monitoring», in proc. *Int. Conf. ICEM'90*, MIT, Boston, USA, pp 13-17, 1990.
- [27] W.T. Thomson, S.J. Chalmers and D. Rankin, «On-line current monitoring and fault diagnosis in high voltage induction motors – case histories and cost savings in offshore installations», in proc. *Offshore Europe '87*, Aberdeen, UK, SPE16577-MS, Sept. 1987.
- [28] R.R. Schoen, T.G. Habetler and F. Kamran, «Motor bearing damage detection using stator current monitoring» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 6, pp. 1274-1279, Nov./Dec. 1995.
- [29] W.T. Thomson and M. Fenger, «Current signature analysis to detect induction motor faults», *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26-34, Jul./Aug. 2001.
- [30] W.T. Thomson, «A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors – past present and future», in proc. *IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, Gijon, Spain, pp 3-18, Sept. 1999.
- [31] O.V. Krukov, A.V. Serebryakov and A.V. Vasenin, «Diagnosis electromechanical part of wind turbines», *Electromechanical and Energy-Saving Systems*, vol. 3, no. 19, pp. 549-552, 2012.
- [32] A.S. Steklov, V.G. Titov and A.V. Serebryakov, «Determination of degree of use of ship synchronous generators with the use of artificial neuro-fuzzy nets», *Bulletin of the Chuvash University*, no. 1, pp. 97-104, 2016.
- [33] A.S. Steklov, «Neuro-fuzzy modeling of the degree of efficiency of transformers at ship electric power plants», *Electrotechnical Systems and Complexes*, vol. 3, pp. 39-43, 2016.
- [34] A.V. Serebryakov, A.S. Steklov and V.G. Titov, «New technological diagnostics algorithm of required electric motors», *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 82-88, 2017.