



Ветроэлектрическая станция в системе распределённой генерации

Введение

Энергетика России развивается по двум направлениям, представляющая большую и малую (распределённую) энергетику. При этом распределённая энергетика по значимости не уступает большой. В число распределённой энергетики относятся установки мощностью до 30 МВт, которые развиваются на базе традиционной с использованием дизельной, газопоршневой или газотурбинной электростанции и нетрадиционной на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1].

Наиболее перспективным направлением в развитии распределённой энергетики являются многофункциональные энерготехнологические комплексы (МЭК) модульного типа на базе гибридных энергоустановок. Под многофункциональностью следует понимать возможность такого комплекса производить из местных топливно-энергетических ресурсов моторные топлива, электрическую и тепловую энергию. Использование местных энергоресурсов позволит решить многие вопросы энергоснабжения, улучшить социально-экономическую и экологическую обстановку [2].

МЭК позволяет объединить все типы энергетических установок, предназначенных для производства прежде всего элек-

трической и тепловой энергии. При этом в составе МЭК возможны энергоустановки на базе ВИЭ. В условиях роста цен на энергоносители традиционные источники становятся затратными, в то время как ВИЭ позволяют снизить затраты на потребляемую энергию за счёт экономии органического топлива [3–5].

Наиболее перспективным направлением в развитии распределённой энергетики являются многофункциональные энерготехнологические комплексы модульного типа на базе гибридных энергоустановок

Развитие возобновляемой энергетики в мире приняло устойчивый характер и достигает в развитых и развивающихся странах 10–25 % ежегодной выработки электроэнергии. Самые крупные энергоустановки на базе ВИЭ применяются в таких странах, как: США, Китай, Германия [ветрофермы и солнечные фотоэлектрические станции (ФЭС)]; Франция (приливные электростанции), Япония, Южная Корея (солнечные ФЭС); Италия, Исландия (геотермальные станции) [6, 7].

Рецензия эксперта на статью получена 24.09.2018 [Expert review of the article received September 24, 2018].

УДК 631.371:658.26

Ветроэлектрическая станция в системе распределённой генерации

Сакен К. Шерьязов, д.т.н., профессор, Южно-Уральский государственный аграрный университет (ЮУрГАУ, Челябинск)

В статье рассмотрена необходимость развития энергетики на базе источников малой (распределённой) генерации. Распределённая энергетика позволяет гибко управлять самой системой и снизить потери энергии при передаче её. При этом наиболее перспективным направлением в распределённой генерации является использование ветроэлектрических установок. Для эффективного электроснабжения ветроэлектрические установки объединяются в составе ветропарка для снижения затрат на передачу электроэнергии, а ветропарки — в состав ветроэлектрической станции для снижения затрат на выработку электрической энергии. В статье приведены условия выбора ветроэлектрических установок в составе ветропарка и ветроэлектрической станции для эффективного электроснабжения.

Ключевые слова: электроснабжение, распределённая генерация, ветроэнергетика, ветроэлектрические установки, ветропарки, ветроэлектрическая станция.

UDC 631.371:658.26

Wind power station in a distributed generation system

Saken K. Sheryazov, Doctor of Technical Sciences, Professor, South Ural State Agrarian University (Chelyabinsk city)

The necessity of development of power engineering on the basis of sources of small (distributed) generation is considered in the article. Distributed energy allows you to flexibly manage the system and reduce energy losses in the transmission of it. The most promising direction in distributed generation is the use of wind power plants. For efficient power supply, wind power plants are combined in a wind farm to reduce the cost of electricity transmission, and wind farms are part of a wind power plant to reduce the cost of generating electricity. The article describes the conditions for choosing wind power plants in the wind park and wind power plant for efficient power supply.

Key words: power supply, distributed generation, wind power, wind power plants, wind farm, wind power station.

Из всех направлений ВИЭ ветроэнергетические установки (ВЭУ) в настоящее время являются наименее капиталоемкими и более конкурентоспособными. Среди самых больших по установленной мощности ветроэлектрических станций (ВЭС), например, наземная ВЭС мощностью 1,55 ГВт в штате Калифорния (США) и морская ВЭС мощностью 210 МВт в Северном море на западном побережье Ютландии (Дания). По фотоэлектрическим станциям лидирует КНР с общей установленной мощностью 15 ГВт, из строящихся установок выделяется возводимая в штате Калифорния (США) ФЭС мощностью порядка 550 МВт [5, 8].

В России суммарная установленная мощность электрогенерирующих установок, использующих ВИЭ (без учёта ГЭС установленной мощностью более 25 МВт), не превышает 2,2 ГВт. Они вырабатывают около 8,5 млрд кВт·ч электроэнергии, что составляет примерно 1 % от общего объёма производства электроэнергии в РФ [9].

Общая тенденция развития возобновляемой энергетики в России с 2000 года имеет положительную динамику. Действует Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 года №449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». Постановление рассматривает поддержку гидро-, ветро- и солнечных электрогенерирующих установок мощностью более 5 МВт. Уже запущены и действуют солнечные электростанции (СЭС) на Алтае, в Оренбургской области и республике Башкортостан. Данный опыт может быть распространён и на ВЭС, уже существуют соответствующие проекты и производятся их реализация в Ульяновской области.

В России, согласно правительственному Постановлению от 8 января 2009 года №1-р, планируется к 2025 году увеличение доли ВИЭ в энергетике до 4,5 % (без учёта больших ГЭС) [15]. При подготовке данного постановления был использован проект, определявший долю ВЭС в выработке электроэнергии 17,5 млрд кВт·ч при суммарной мощности ВЭС, равной 7,0 ГВт [5].

В настоящее время суммарная мощность ветроэнергетических установок в России составляет 103 МВт [9]. В перспективе следует ожидать её роста для достижения поставленной цели.

Таким образом, использование ВЭУ в системе распределённой генерации в целом является актуальной задачей. Для эффективного их использования необходимо определить условия их выбора и функционирования.

В России суммарная установленная мощность электрогенерирующих установок, использующих ВИЭ (без учёта ГЭС установленной мощностью более 25 МВт), не превышает 2,2 ГВт. Они вырабатывают около 8,5 млрд кВт·ч электрической энергии, что составляет примерно 1 % от общего объёма производства электроэнергии в Российской Федерации

ежегодным измерениям несложно установить график изменения электрической нагрузки, как в электрических сетях, так и на вводе потребителя. Тогда после согласования графика изменения электрической нагрузки с режимом поступления ветровой энергии можно определить установленную мощность ВЭС.

Например, в условиях Челябинской области исследованы графики изменения мощности ветрового потока [4] и электрической нагрузки в сети [10]. Результаты исследования приведены на рис. 2.

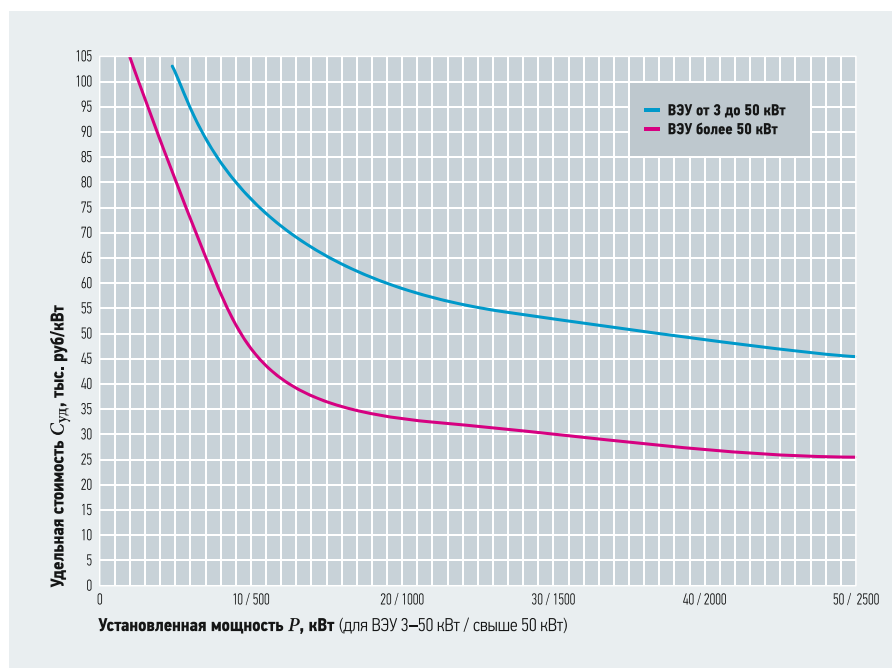


Рис. 1. Удельная стоимость ВЭУ

Постановка задачи и её решение

Для строительства ВЭС важно определить её состав и условия эффективного использования ВЭУ в зависимости от ветроэнергетических ресурсов местности и требуемых затрат на установки. Анализ стоимостных показателей существующих ВЭУ [4] позволил получить зависимость удельной стоимости от установленной мощности (рис. 1).

Анализ данных показывает, что по затратам для обеспечения потребной мощности лучше использовать несколько ВЭУ, объединённых в ВЭС. Так, например, для обеспечения потребной мощности более 100 кВт экономически выгоднее использовать несколько ВЭУ мощностью по 50 кВт.

Количество ВЭУ и суммарная мощность ВЭС, соответственно, зависят от режимов выработки и потребления электроэнергии. По сути, необходимо учитывать случайный характер поступающей ветровой энергии и график изменения электрической нагрузки. На практике по

Сравнительный анализ графиков мощности ветрового потока (сплошная линия) и электрической нагрузки (пунктирная линия) показывает, что количество вырабатываемой энергии от ветроэнергетической установки увеличивается днём, а ночью уменьшается, как и электрическая нагрузка. Совпадение максимумов мощности ветрового потока и электрической нагрузки, как в летний, так и в зимний периоды, позволяет снизить потребление электроэнергии от существующей системы электроснабжения во время максимальных нагрузок, когда наблюдаются максимальные потери электроэнергии при её передаче.

Эффективность использования ВЭС зависит от необходимых затрат на выработку электроэнергии от ветроэнергетической установки и передачу её непосредственно до потребителей.

Для минимизации затрат на выработку электроэнергии от ветроэлектрической станции предложена математическая модель [4, 11].

Данная модель позволяет определить основные показатели ВЭС, а также установленную мощность ВЭУ в зависимости от ветровых условий местности и характеристики потребителя:

$$C_{\text{выр}} = \frac{a_1 K_{\text{уд.ВИЭ1}}}{W_{\text{уд.ВИЭ1}}} x_1 + \frac{a_2 K_{\text{уд.ВИЭ2}}}{W_{\text{уд.ВИЭ2}}} x_2 + \dots + \frac{a_i K_{\text{уд.ВИЭi}}}{W_{\text{уд.ВИЭi}}} x_i \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где $C_{\text{выр}}$ — удельные затраты на выработку электроэнергии, руб/кВт·ч; x_i — количество i -х ВЭУ в составе ВЭС; $W_{\text{уд.ВЭУi}}$ — удельная выработка электроэнергии от ВЭУ, кВт·ч/м²; a — суммарные ежегодные отчисления на реновацию и текущий ремонт ВЭУ; $K_{\text{уд.ВЭУi}}$ — удельные капиталовложения на ВЭУ, руб/м².

Для исследования целевой функции приняты следующие ограничения:

$$\begin{cases} P_1 x_1 + P_2 x_2 + \dots + P_i x_i \leq P_{\text{расч}}; \\ 100 d_1^2 x_1 + 100 d_2^2 x_2 + \dots + 100 d_i^2 x_i \leq S; \\ 0,785 d_1^2 x_1 W_{\text{уд.ВИЭ1}} + 0,785 d_2^2 x_2 W_{\text{уд.ВИЭ2}} + \dots + 0,785 d_i^2 x_i W_{\text{уд.ВИЭi}} \leq 0,01 S W_{\text{уд}}, \end{cases} \quad (2)$$

где P — мощность рассматриваемого типа ВЭУ, кВт; d — диаметр ветроколеса, м; $P_{\text{расч}}$ — расчётная нагрузка, кВт; S — площадь имеющейся территории, м²; $W_{\text{уд}}$ — ветроэнергетический ресурс с удельной площади территории, кВт·ч/м².

В представленной модели важно установить ограничение по мощности ВЭС. Если её принять равной расчётной нагрузке электрической сети, следует ожидать недоиспользование мощности ВЭС в условиях снижения нагрузки. При этом себестоимость вырабатываемой электроэнергии от ВЭС будет выше ожидаемой.

Для эффективного использования ветроэлектрических станций предлагается согласовать мощность ветрового потока с электрической нагрузкой. Согласно приведённому графику электрической нагрузки предлагается ограничить мощность ВЭС по минимальной нагрузке, являющейся базовой, которая составляет почти 50% максимальной мощности.

Тогда для полного использования мощности ВЭС следует принять её мощность равной базовой $P_{\text{мин}}$, и ограничение по мощности примет вид:

$$P_1 x_1 + P_2 x_2 + \dots + P_i x_i \leq P_{\text{мин}}. \quad (3)$$

ВЭС по данному условию будет замещать только часть потребляемой электрической энергии. Для полного обеспечения потребной энергии ВЭС должна работать совместно с традиционным источником электроэнергии.

Для эффективного использования ВЭС также необходима минимизация затрат и на передачу электрической энер-

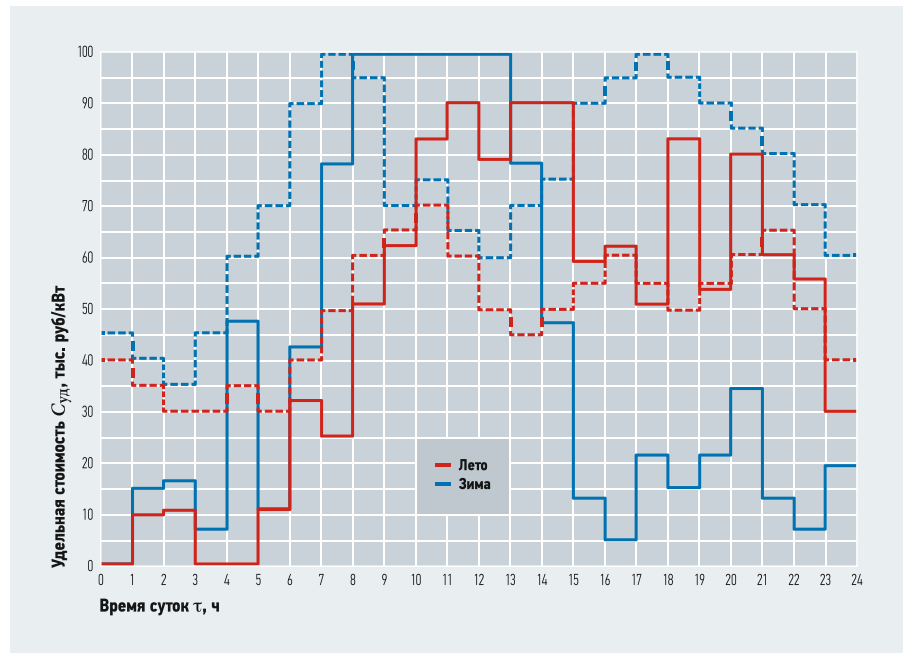


Рис. 2. Суточные графики изменения мощности ветрового потока и электрической нагрузки

гии. Для этого необходима компоновка схемы ВЭС с установкой центрального пункта для сбора потока мощности от всех ВЭУ для дальнейшей передачи её в электрическую сеть или непосредственно потребителям.

Для эффективного использования ВЭС предлагается согласовать мощность ветрового потока с электрической нагрузкой. Согласно приведённому графику электрической нагрузки предлагается ограничить мощность ВЭС по минимальной нагрузке (являющейся базовой), которая составляет почти 50% максимальной мощности

Для эффективной передачи электрической энергии потребуется трансформация напряжения после согласования напряжений источника и существующей электрической сети. Трансформаторная подстанция, как правило, повышающая напряжение, может быть установлена в центре электрических нагрузок — внутри занимаемой территории ВЭС. Такая компоновка схемы с центральным пунктом сбора и передачи электроэнергии (ЦП) позволяет минимизировать потери и затраты в целом.

Тогда для определения условий передачи электроэнергии следует выделить затраты на передачу электроэнергии по внутренней (от самих ВЭУ до ЦП) и по внешней сетям (от ЦП до электрической

сети или потребителей). При этом для минимизации затрат на передачу электрической энергии возможно эффективно объединять несколько ВЭУ, связанных с ЦП линиями электропередачи.

Для минимизации затрат на передачу электрической энергии от ВЭС предложена целевая функция, позволяющая определить показатели электрической сети в зависимости от количества ВЭУ:

$$C_{\text{пер}} = \frac{b_1 K_{\text{уд.эс1}}}{\sum (W_i - \Delta W_i)} n_1 + \frac{b_2 K_{\text{уд.эс2}}}{\sum (W_2 - \Delta W_2)} n_2 + \dots + \frac{b_i K_{\text{уд.эси}}}{\sum (W_i - \Delta W_i)} n_i \Rightarrow \min, \quad (4)$$

где $C_{\text{пер}}$ — удельные затраты на передачу электроэнергии, руб/кВт·ч; n_i — количество i -х ВЭУ; $\sum W$ — суммарная выработка электроэнергии от ВЭС, кВт·ч; $K_{\text{уд.эс}}$ — капиталовложения на электрическую сеть ВЭС, руб.; b — ежегодные суммарные отчисления на содержание электрической сети ВЭС в рабочем состоянии.

При исследовании необходимых затрат на передачу электроэнергии следует принять ограничение:

$$1 \leq n_i \leq x_i, \quad (5)$$

поскольку оптимальное количество ВЭУ в составе ВЭС при решении целевых функций (1) и (4) могут отличаться.

В случае, если оптимальное количество ВЭУ n_i для передачи электроэнергии меньше оптимального количества для её выработки x_i , предлагается разделить ВЭС на несколько ветропарков. При этом каждый ветропарк представляет собой группу ВЭУ, подключённых к одному центру питания, возможно, и с трансформаторной подстанцией (рис. 3).

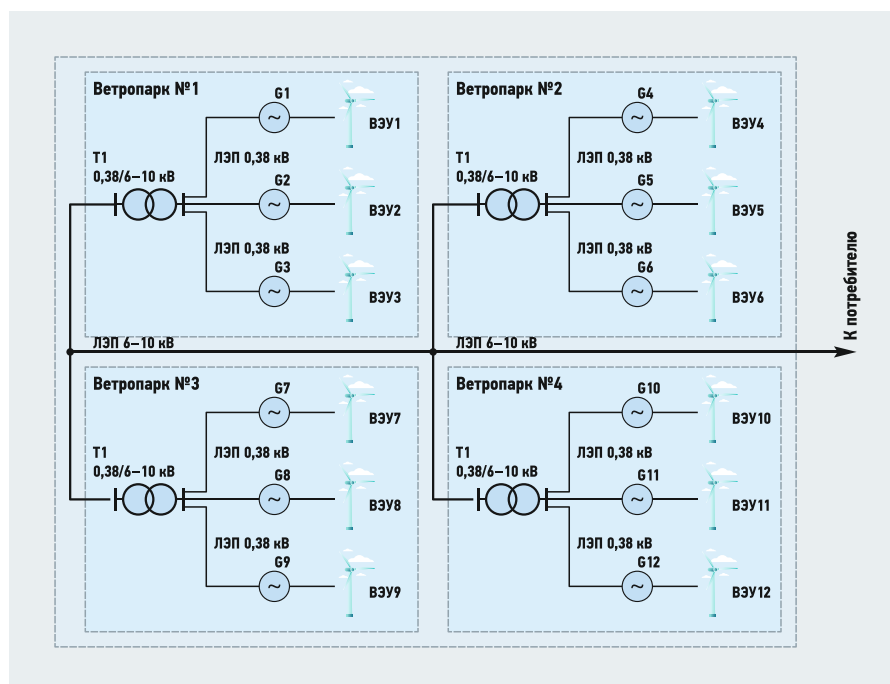


Рис. 3. Структурная схема ВЭС (при $x \approx 4n$)

Совместное решение целевых функций (1) и (4) показали, что существуют экономически выгодные ВЭС, состоящие из одного или нескольких ветропарков.

После выбора ВЭС с оптимальными параметрами, обеспечивающими минимальные затраты на выработку и передачу электрической энергии, несложно определить удельные затраты на электроснабжение в целом. При этом согласно условию (3) необходимо учитывать совместную работу ВЭС с традиционным источником и долю электрической энергии, передаваемую по электрической сети или потребляемую электроприёмниками.

Удельные затраты на электроснабжение от комбинированной системы должна учитывать затраты на электроэнергию от традиционного источника. Тогда стоимость электроэнергии при использовании ВЭС совместно с традиционным источником в системе электроснабжения можно определить по выражению [12]:

$$C_c = C_T(1 - f) + C_{ВЭС}f, \quad (6)$$

где C_T — стоимость электроэнергии от традиционного источника, руб/кВт·ч; $C_{ВЭС}$ — стоимость электроэнергии от ВЭС, руб/кВт·ч; f — доля замещаемой электрической энергии от ВЭС.

ВЭС может вырабатывать электроэнергию в электрическую сеть или конкретному потребителю. Тогда, например, при средней цене электроэнергии от традиционного источника 6 руб. и от ВЭС 4 руб. за 1 кВт·ч, стоимость электроэнергии от комбинированной системы при $f = 0,5$ может составить:

$$C_c = 6 \times (1 - 0,5) + 4 \times 0,5 = 5 \text{ руб/кВт·ч.}$$

Полученный результат показывает снижение удельных затрат на передаваемую электрическую энергию на 1 руб. за 1 кВт·ч или на 17 %. В условиях выхода ВЭС на оптовый рынок электрической энергии, согласно Постановлению Правительства РФ №449, окупаемость электростанции может сократиться из-за роста стоимости электроэнергии в пиковые часы спроса на электроэнергию.

После выбора ВЭС с оптимальными параметрами, обеспечивающими минимальные затраты на выработку и передачу электрической энергии, несложно определить удельные затраты на электроснабжение в целом. При этом согласно условию (3) необходимо учитывать совместную работу ВЭС с традиционным источником

Заключение

Одним из способов энергосбережения посредством снижения потерь энергии, особенно при её передаче, является развитие распределённой генерации на основе многофункционального энерготехнологического комплекса, который служит для производства электрической и тепловой энергии. При этом в условиях роста затрат на традиционные энергоносители в составе МЭК возможно использование возобновляемых источников, в частности, ветроэлектрических установок.

Развитие ветроэнергетики в системе распределённой генерации способствует повышению её энергоэффективности и снижению затрат на потребляемую энергию. Для распределённой генерации на базе ВЭУ важно определить условия выбора источников энергии с оптимальными параметрами.

Для эффективного электроснабжения потребуется несколько ВЭУ в составе ВЭС, количество которых следует оптимизировать по объёму вырабатываемой электроэнергии. При этом для снижения затрат на передачу электрической энергии необходимо сначала объединить их в составе ветропарка с центром сбора и передачи энергии. Ветропарки, в свою очередь, могут быть объединены в составе одной ВЭС для минимизации затрат на выработку электрической энергии.

В качестве примера рассмотрены условия выбора ВЭС в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов. Результаты исследования в условиях Челябинской области показывают, что при замещении передаваемой электроэнергии от ВЭС на 50 % её стоимость снижается примерно на 17 %.

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года / Распоряжение Правительства РФ от 13.10.2009 №1715-р.
2. Грачёв И.Д., Ильковский К.К., Есяков С.Я., Редько И.Я., Либет А.А., Ливинский А.П., Иванов В.Б., Варфоломеев С.Д., Артиков Р.Х.-Б. О Концепции развития распределённой энергетики // Журнал С.О.К., 2014. №11. С. 18–22.
3. Sheryazov S.K., Ptashkina-Girina O.S. Increasing power supply efficiency by using renewable sources. Proc. of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. May 19–20, 2016. Chelyabinsk, Russia.
4. Шерязов С.К., Шелубаев М.В. Ветроэлектрические установки в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей: Монография. — Челябинск: ЮУрГАУ, 2018. 184 с.
5. Велькин В.И. Методология расчёта комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах. — Екатеринбург: УрФУ, 2015. 226 с.
6. Verlinden Julia. Ohne die Gru_nen gabe es das EEG nicht. PV magazine, März 31, 2015. Web-source: pvmagazine.de. Access date: November 16, 2016.
7. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century '2016. REN21 Secretariat. Paris, May 04, 2016. Web-source: ren21.net. Access date: November 16, 2016.
8. Развитие технологий ветроэнергетики в мире [Электр. ресурс] / Аналитический центр при Правительстве РФ, Октябрь 2013. Режим доступа: ac.gov.ru. Дата общ.: 16.11.2016.
9. Kuznetsov D., Mennen H. Analyse der Schlusselfaktoren zur Entwicklung erneuerbarer Energien in Russland. Agro-Industrial Complex of Russia. 2016. Vol. 23. No. 2. Chelyabinsk. South Ural State Agrarian University. Pp. 356–367.
10. Гуртовец А.Л., Забелло Е.П. Электрическая нагрузка в энергосистеме // Новости электротехники, 2008. №5. С. 15–23.
11. Шерязов С.К., Шелубаев М.В. Разработка метода определения параметров ветропарка // Вестник КрасГАУ, 2014. Вып. 10. С. 182–187.
12. Шерязов С.К. Возобновляемые источники в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей: Монография. — Челябинск: ЮУрГАУ, 2008. 300 с.

References — see page 95.

Wind power station in a distributed generation system. Pp. 90–93.

Saken K. Sheryazov, Doctor of Technical Sciences, Professor, South Ural State Agrarian University (Chelyabinsk city)

1. *Jenergeticheskaja strategija Rossii na period do 2030 goda* [Energy Strategy of Russia for the period until 2030]. *Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 13.10.2009* [Order of the Government of the Russian Federation of October 13, 2009] No. 1715-r.
2. Grachjov I.D., Il'kovskij K.K., Esjakov S.Ja., Red'ko I.Ja., Libet A.A., Livinskij A.P., Ivanov V.B., Varfolomeev S.D., Artikov R.H.-B. *O koncepcii razvitiya rasprelennoj jenergetiki* [On the Concept of distributed energy development]. *Zhurnal Santehnika, otopenie, kondicionirovanie* (S.O.K.) [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2014. No. 11. Pp. 18–22.
3. Sheryazov S.K., Ptashkina-Girina O.S. Increasing power supply efficiency by using renewable sources. Proc. of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. May 19–20, 2016. Chelyabinsk, Russia.
4. Sheryazov S.K., Shelubaev M.V. *Vetroelektricheskie ustanovki v sisteme elektrosnabzhenija sel'skohozjajstvennyh potrebitel'ev: Monografija* [Wind power plants in the power supply system of agricultural consumers: Monograph]. Chelyabinsk. JuUrGAU [South Ural State Agrarian University]. 2018. 184 p.
5. Vel'kin V.I. *Metodologija rascheta kompleksnyh sistem VIJe dlja ispol'zovanija na avtonomnyh ob'ektah* [Methodology of calculation of complex renewable energy sources systems for use in autonomous objects]. Ekaterinburg. UrFU [Ural Federal University]. 2015. 226 p.
6. Verlinden Julia. Ohne die Grünen gabe es das EEG nicht. PV magazine. März 31, 2015. Web-source: pvmagazine.de. Access date: November 16, 2016.
7. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century '2016. REN21 Secretariat. Paris, May 04, 2016. Web-source: ren21.net. Access date: November 16, 2016.
8. *Razvitie tehnologij vetrojenergetiki v mire* [Development of wind power technologies in the world]. *Analiticheskij centr pri Pravitel'stve RF* [Analytical Center under the Government of the Russian Federation]. October, 2013. Web-source: ac.gov.ru. Access date: November 16, 2016.
9. Kuznetsov D., Mennen H. Analyse der Schlüsselfaktoren zur Entwicklung erneuerbarer Energien in Russland. Agro-Industrial Complex of Russia. 2016. Vol. 23. No. 2. Chelyabinsk. South Ural State Agrarian University. Pp. 356–367.
10. Gurtovec A.L., Zabello E.P. *Elektricheskaja nagruzka v jenergosisteme* [Electric load in the power system]. *Novosti jelectrotehniki* ["News of Electrical Engineering" Magazine]. 2008. No. 5. Pp. 15–23.
11. Sheryazov S.K., Shelubaev M.V. *Razrabotka metoda opredelenija parametrov vetroparka* [Development of a method for determining the parameters of a wind farm]. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU (Krasnoyarsk State Agrarian University)]. 2014. Issue 10. Pp. 182–187.
12. Sheryazov S.K. *Vozobnovljajemye istochniki v sisteme jenergosnabzhenija sel'skohozjajstvennyh potrebitel'ev: Monografija* [Renewable sources in the energy supply system of agricultural consumers: Monograph]. Chelyabinsk. JuUrGAU [South Ural State Agrarian University]. 2008. 300 p.