

УДК 621.22-546

К. В. МАХОТИЛО, И. И. ЧЕРВОНЕНКО, В. С. КУЛЕШОВ, К. В. КУЛЕШОВА**СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩИХ УЗЛОВ, ОБЪЕДИНЯЮЩИХ СТАНЦИИ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ**

Розглянуто задачу створення енергогенеруючих вузлів, які об'єднують вітрові та сонячні електростанції. На базі балансової моделі енерговузла досліджено вплив потужності ВЕС і СЕС та визначені коефіцієнти відносини встановленої потужності станції до потужності навантаження, що забезпечують необхідне добове вироблення енергії. Для підтримки миттєвого балансу потужності у вузлі запропоновано включити в його склад ГАЕС. Показана необхідність підвищення ефективності ГАЕС за рахунок застосування асинхронізованих синхронних генераторів і синтезована система автоматичного управління оборотними гідроагрегатами.

Ключові слова: сонячна електростанція, вітрова електростанція, гідроакumuлююча електростанція, енерговузол, асинхронізований генератор, змінна частота обертання.

Рассмотрена задача создания энергогенерирующих узлов, объединяющих ветровые и солнечные электростанции. На базе балансовой модели энергоузла исследовано влияние мощности ВЭС и СЭС и определены коэффициенты отношения установленной мощности станции к мощности нагрузки, обеспечивающие требуемую суточную выработку энергии. Для поддержания мгновенного баланса мощности в узле предложено включить в его состав ГАЭС. Показана необходимость повышения эффективности ГАЭС за счет применения асинхронизированных синхронных генераторов и синтезирована система автоматического управления обратимыми гидроагрегатами.

Ключевые слова: солнечная электростанция, ветровая электростанция, гидроаккумуляционная электростанция, энергоузел, асинхронизированный генератор, переменная частота вращения.

The problem of creation of power generating nodes comprising wind and solar power stations is considered. The impact of the wind farm and the PV station capacities on the possibility of providing a generation and consumption balance in the power node was investigated based on its balance model. There are determined ratios of the plants installed capacities to the load power are, which ensure the required daily energy output. To ensure coverage of the daily load profile it is proposed to include the PSPP in the node. The daily operating modes of power station were analyzed and the ability of the PSPP to maintain an instantaneous power balance was shown. It is exposed the necessity of increasing the efficiency of the PSPP during work in the typical for the proposed power node sharply varying modes. For this, it is proposed to use asynchronous generators in the composition of reversible hydroelectric power unit of the PSPP. The automatic control system of the PSPP unit is synthesized, which allows ensuring its maximum efficiency when working with variable water pressure at the station. This opens up opportunities for creating efficient energy generating nodes based on renewable energy sources.

Keywords: solar power station, wind power station, pumped storage power plant, power generating node, asynchronous generator, variable speed.

Введение. Сейчас можно уверенно сказать, что мировая энергетика вступила в новый виток своего развития, характеризующийся постепенным отказом от органического топлива, такого как уголь, газ и нефть, и переходом на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [1]. Главным двигателем этого процесса является стремление сократить вредные выбросы в окружающую среду, необратимо изменяющие климат планеты, и снизить потребление углеводородов, запасы которых стремительно снижаются.

Лидером по темпам развития среди всех видов ВИЭ являются ветровые (ВЭС) и солнечные (СЭС) электростанции [1, 2]. В последние годы по объемам инвестиций ВЭС и СЭС существенно опережают тепловые и атомные станции. Причем характерно то, что ветровая и солнечная энергетика наиболее динамично развивается в промышленно развитых странах, таких как Германия, Китай, США, Япония и т.д. [1, 3]. В Украине по состоянию на 1 января 2017 года эксплуатировались ВЭС суммарной мощностью более 420 МВт и СЭС суммарной мощностью более 430 МВт [4]. За 2016 год установленная мощность электростанций, работающих на ВИЭ увеличилась на 120 МВт в том числе и за счет малых ГЭС и биогазовых электростанций.

Однако стремительное увеличение генерации энергии на ВЭС и СЭС ставит новые проблемы перед энергосистемами. Значительные суточные и сезонные вариации мощности ВЭС и СЭС, негативно влияют на

работу других электростанций и энергосистемы в целом. Одним из путей решения этой проблемы, является объединение ВЭС и СЭС в рамках электрогенерирующих узлов энергосистемы.

Это направление сейчас активно исследуется во всем мире [5-10]. Однако большинство предлагаемых решений связано с созданием автономных энергоузлов, питающие изолированные системы небольшой мощности. В основном это касается энергосистем островов [9, 10]. В то же время наибольшие преимущества от создания энергоузлов, в состав которых входят разнообразные ВИЭ, можно получить в рамках объединенных энергосистем.

Целью данной работы является обоснование возможности создания эффективных энергоузлов, в которые входят ВЭС, СЭС и ГАЭС в рамках объединенной энергосистемы Украины.

Энергогенерирующие узлы. В рамках энергогенерирующего узла возможно добиться сглаживания суточного графика генерации за счет разного характера зависимости мощности ВЭС и СЭС от метеословий, а также значительно снизить вероятность полного отсутствия генерации. Это хорошо видно на рис. 1, где показаны нормированные к номинальной установленной мощности станции графики генерации энергии на СЭС ($P_{СЭС}^*$) и ВЭС ($P_{ВЭС}^*$), расположенных в полосе 50° с.ш., за июль 2016 г. [11]. Сравнив графики, можно сделать вывод,

© К. В. Махотило, И. И. Червоненко, В. С. Кулешов, К. В. Кулешова, 2017

что прямой зависимости между $P_{СЭС}^*$ и $P_{ВЭС}^*$ нет. Выработка на ВЭС может быть большой и при солнечной погоде (дни 5, 10, 11), и в пасмурные дни (дни 2, 13). Безветренные дни могут быть как пасмурными (дни 12, 31), так и солнечными (дни 1, 4, 7). Благодаря этому, работая совместно ВЭС и СЭС могут компенсировать вариации мощности друг друга.

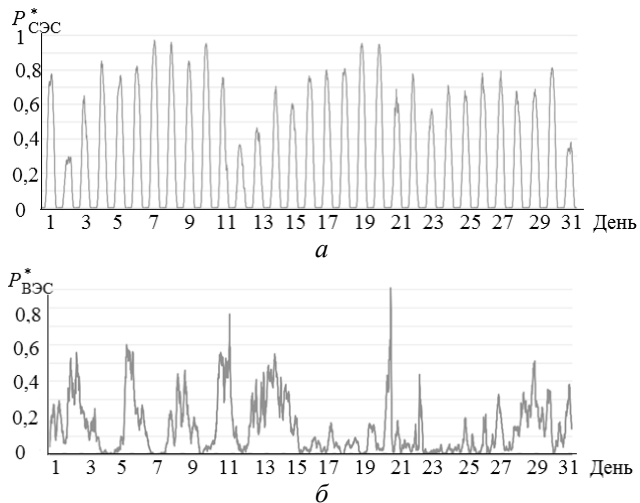


Рис. 1 – Мощность электростанций в относительных единицах в июле: а – СЭС; б – ВЭС

Другим преимуществом энергогенерирующих узлов является способность обеспечить потребности отдельного узла нагрузки, что позволяет применять их в системах с распределенной генерацией энергии [12-14]. Наличие источников энергии в непосредственной близости от нагрузки увеличивает надежность энергоснабжения потребителей, повышает устойчивость энергосистемы и способствует снижению потерь в сетях.

Область применения таких гибридных энергогенерирующих узлов очень широкая и они могут решать большой спектр задач, в том числе и обеспечение автономности энергоснабжения конкретного потребителя или группы потребителей. Конфигурации энергоузла, также могут быть разнообразными и включать, как традиционные источники энергии вместе с СЭС и ВЭС, так и различные накопители электрической энергии.

Повышение эффективности работы энергогенерирующих узлов. Для исследования режимов работы энергогенерирующих узлов, в состав которых входят СЭС и ВЭС, на основе описанных в [15-18] подходах предложена балансовая модель, учитывающая характерные для Украины метеосостояния и режимы потребления энергии. Все графики выработки электростанций, входящих в состав узла, заданы на основе типичных графиков суточных изменений скорости ветра и солнечной инсоляции в разное время года. Мощность электрической нагрузки потребителя также задана с учетом сезонных факторов. Моделирование работы узла осуществляется в относительных единицах, где за базу взят годовой максимум мощности нагрузки.

Установленная мощность электростанций задается с помощью коэффициентов $k_{ВЭС}$ и $k_{СЭС}$, равных отношению мощности станции к максимальной мощности нагрузки.

Разработанная модель позволила проанализировать режимы работы энергоузла в разные сезоны года, оценить возможный объем генерации электрической энергии и определить параметры электростанций, входящих в его состав, при которых будет достигаться полное покрытие потребностей потребителя при типичных вариациях метеосостояний.

Влияние величин установленных мощностей СЭС и ВЭС на баланс в узле показан на рис. 2 для зимнего сезона. Как видно, зимой суточный баланс потребления и генерации электроэнергии в узле ($\Delta W^* = 0$) может быть достигнут только при условии, что мощность СЭС и ВЭС в 6,5 раз превышает мощность нагрузки. Такой уровень соотношения означает высокую стоимость сооружения ВЭС и СЭС, а также значительный избыток генерации в узле в летнем сезоне. Кроме того, достижение суточного баланса энергии в узле не означает возможность обеспечения моментального баланса мощностей в каждом часе суток.

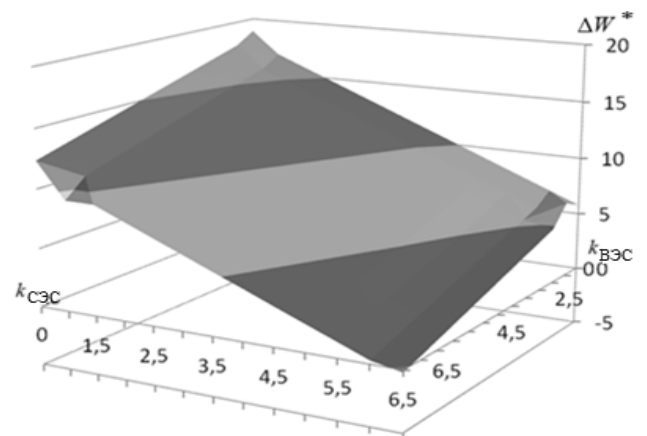


Рис. 2 – Разница между суточным потреблением и генерацией энергии в узле в зависимости от мощностей СЭС и ВЭС (зима)

Одним из возможных путей снижения величин $k_{ВЭС}$ и $k_{СЭС}$, требуемых для гарантированного покрытия нагрузки в любой момент времени, и повышения эффективности работы узла является использование накопителей электроэнергии. Аккумуляция позволяет перераспределить потоки мощности между временными периодами, где генерация превышает потребления и где наблюдается отрицательный баланс. Также возникает возможность повысить общую надежность энергоснабжения в узле.

Анализ существующих способов аккумуляции энергии показывает, что наиболее эффективными способами хранения энергии являются химические аккумуляторы, но при существенных мощностях потребителя и электростанций – лучше использовать гидроаккумулирующие электростанции. На сегодняшний день ГАЭС – это наиболее

распространенный способ хранения электрической энергии [19]. По сравнению с химическими аккумуляторами ГАЭС практически не ограничены по мощности агрегатов на станции и имеют на порядок более длительный срок эксплуатации.

На рис. 3 показана структура подключенного к объединенной энергосистеме (ОЭС) энергоузла, в состав которого входит СЭС, ВЭС и аккумулятор энергии (АК) [6, 17, 20]. В качестве АК рассматривается гидроаккумулирующая станция, а взаимодействие всех элементов организуется с помощью автоматической системы управления (СУ).

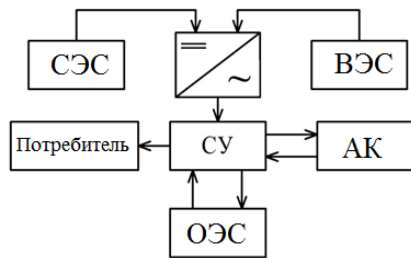


Рис. 3 – Структура энергогенерирующего узла

График генерации и потребления энергии в узле показан на рис. 4. Положительные значения мощности ГАЭС (P_{AK}) означают ее работу в генераторном режиме, а отрицательные – в насосном, т.е. в режиме накопления энергии путем закачки воды в верхний бассейн. Как видно, использование ГАЭС позволяет поддерживать баланс в узле и обеспечить требуемый график нагрузки.

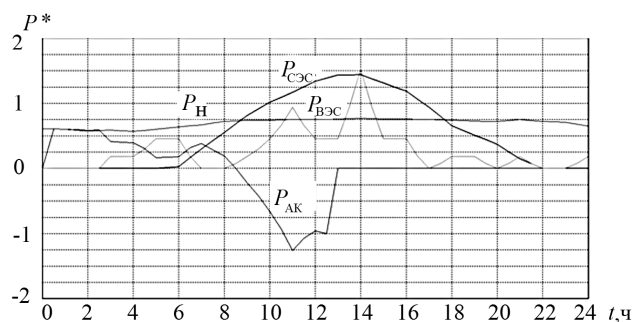


Рис. 4 – График генерации и потребления энергии в узле

Повышение эффективности ГАЭС при работе в составе энергогенерирующих узлов. Результат проведенного моделирования работы энергоузла с АК показывают важную особенность. В отличие от обычной практики использования ГАЭС в ОЭС их работа в составе энергогенерирующих узлов будет характеризоваться более частыми в течении суток включениями станции как в турбинный, так и в насосный режим. Также более широкими будут диапазоны изменения рабочего напора и мощности. Как следствие, это приведет к тому, что обратимые агрегаты ГАЭС будут работать в режимах существенно отличных от номинальных, т.е. оптимальных для нее.

Проблема оптимума рабочей характеристики обратимой гидротурбины связана именно с тем, что она работает в двух режимах: турбинном и насосном

[21]. Точки наивысшего КПД для каждого из режимов для одной турбины будут получены при частотах отличных от 50 Гц. Поэтому при проектировании проточной части рабочего колеса турбины изначально закладывается, что в насосном режиме работы при синхронной частоте рабочая характеристика турбины будет иметь практически линейный характер наиболее приближенный к точке максимального КПД. Исходя из этого в турбинном режиме работы эффективность гидроагрегата заведомо ниже, что приводит к недовыработке существенного объема электроэнергии. Анализ характеристик обратимых турбин Днестровской ГАЭС [22-25] показал, что работа с переменной частотой вращения позволит поднять их КПД на 2 %, за счет уменьшения расхода воды через рабочее колесо при поддержании мощности на постоянном уровне.

Наилучшим образом решить эту проблему и обеспечить необходимое качество электроэнергии даже при значительных изменениях частоты вращения ротора способны асинхронизированные синхронные гидрогенераторы (АСГГ). На сегодняшний день они нашли широкое применение на ТЭС и ГЭС, а также все чаще устанавливаются на ВЭС, где проблема работы с переменной частотой вращения особенно актуальна [26]. Мощность современных АСГГ может достигать 400 МВт [27]. Однако использование АСГГ, как генераторов энергоблока ГАЭС, усложнено из-за несовершенства системы управления и проблемам связанных с ее настройкой.

На рис. 5. представлена структурная схема системы возбуждения АСГГ, который имеет на роторе две взаимоперпендикулярные обмотки возбуждения [27-29].

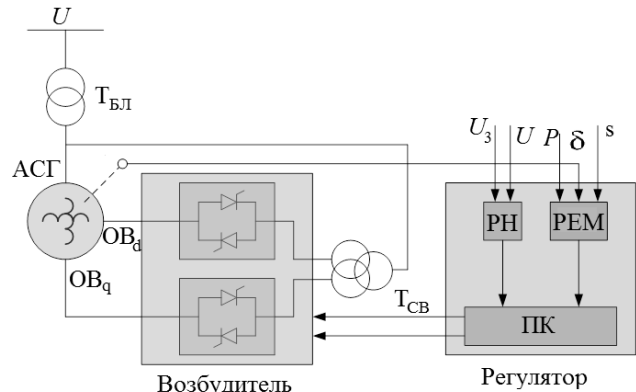


Рис. 5 – Структурная схема системы возбуждения АСГГ

Здесь $T_{бл}$ – блочный трансформатор; OB_d, OB_q – обмотки возбуждения по осям d и q ; $T_{вд}, T_{вq}$ – тиристорные возбудители; $T_{св}$ – трансформатор системы возбуждения; РН – регулятор напряжения; РЭМ – регулятор электромагнитного момента.

Система управления АСГД реализует принципиальную особенность асинхронизированных машин – независимость регулирования электромагнитного момента и напряжения [28, 30]. Еще одна особенность работы АСГГ по сравнению с обычными синхронными генераторами заключается в том, что в процессе работы в АСГГ частота тока

возбуждения может изменяться в зависимости от частоты вращения ротора генератора. При этом существует зависимость между частотой тока возбуждения, частотой вращения ротора генератора и частотой напряжения и тока на шинах электростанции [28]: $\omega_C = \omega_P - \omega_f$, где ω_C – частота напряжения в энергосистеме; ω_P – частота вращения ротора гидроагрегата; ω_f – частота тока возбуждения.

Из-за малости постоянной времени обмоток возбуждения, регулятор является быстродействующим и точным [26]. Это дает ряд преимуществ для создания регулятора частоты вращения гидроагрегатов, работающих с переменной частотой вращения, с целью повышения их КПД.

Учитывая то, что генератор может нормально работать как с синхронной частотой вращения, так и в режиме с переменной частотой вращения, необходимо разработать систему управления гидроагрегатом, которая обеспечит работу агрегата в двух режимах с постоянной и с переменной частотой вращения. Функциональная схема такой системы автоматического управления обратимым гидроагрегатом ГАЭС показана на рис. 6.

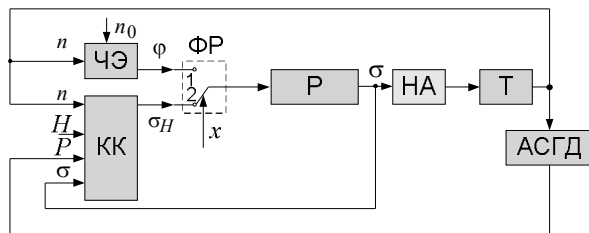


Рис. 6 – Функциональная схема системы управления обратимым гидроагрегатом

Она имеет переменную структуру, изменение которой происходит в зависимости от режима работы [31, 32]. Такие операции как пуск и останов агрегата, перевод с турбинного режима в насосный и наоборот, обеспечение динамики переходных процессов, осуществляет штатный регулятор частоты вращения, обеспечивая поддержание частоты вращения ротора турбины на уровне 50 Гц. А после набора мощности при установившемся рабочем процессе регулятор изменяет структуру и обеспечивает коррекцию КПД турбины за счет изменения открытия направляющего аппарата и, тем самым, изменения расхода воды через проточную часть турбины, и изменение частоты вращения ротора гидроагрегата.

На рис. 7 показана зависимость КПД турбины (η) и расхода воды через рабочее колесо (Q) от напора (H) при постоянной мощности турбины, при синхронной частоте вращения (показано сплошной линией) и при переменной частоте вращения (показано пунктирной линией). Приведенный график показывает, что при изменении частоты вращения ротора гидроагрегата в турбинном режиме работы, даже при номинальном напоре можно добиться повышения КПД за счет уменьшения расхода воды через проточную часть турбины. Для ГАЭС это позволит еще увеличить

продолжительность интервала работы в генераторном режиме при том же объеме срабатываемой воды [33].

Приведенные на рис. 7 зависимости параметров рабочего процесса были получены при допущении изменения частоты вращения ротора на 10 % от номинального значения, т.е. при снижении ее до 45 Гц.

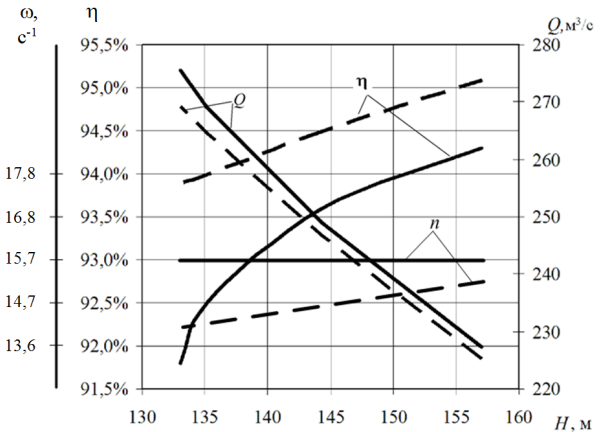


Рис. 7 – Зависимость η , Q от H при $n=\text{const}$ (сплошная линия) и $n=\text{var}$ (пунктирная линия)

Предложенный метод построения САУ предусматривает изменение структуры электрогидравлического регулятора частоты вращения турбины в зависимости от поставленных перед САУ задач, направленных, с одной стороны на обеспечение всех штатных режимов работы энергоблока и надлежащего уровня качества регулирования при переходных процессах, связанных с резкими изменениями ее нагрузки, а с другой стороны, на коррекцию КПД гидротурбин, связанных с изменением напора.

Предложенная система управления обратимым гидроагрегатом ГАЭС с асинхронизированным гидрогенератором способна обеспечить максимальный КПД ГАЭС в составе энергоузла при работе в режимах, определяемых производительностью ВЭС и СЭС.

Это открывает перспективы к созданию объединенных энергоузлов различной мощности, как путь широкого внедрения возобновляемых источников энергии в существующую структуру объединенной энергосистемы Украины.

Выводы.

1. Обоснована целесообразность объединения солнечных и ветровых электростанций в рамках энергогенерирующего узла, с помощью математической модели определено соотношение установленных мощностей электрических станций к мощности нагрузки, при которых будет достигаться суточный баланс выработанной энергии в узле.

2. Доказана необходимость включения в состав энергогенерирующего узла накопителей энергии, в частности гидроаккумулирующих станций. Это позволит обеспечить мгновенный энергобаланс в узле, т.е. обеспечить требуемый характер графика генерации.

3. Энергоузел, в состав которого входят СЭС, ВЭС и ГАЭС, способен обеспечить автономное энергоснабжения отдельного потребителя, что дает возможность применять его как распределенную генерацию в объединенной энергетической системе.

4. Для повышения КПД обратимого гидроагрегата ГАЭС в составе энергоузла предложено использовать асинхронизированный синхронный гидротурбинный генератор.

5. Предложен и обоснован метод построения САУ, который предусматривает изменение структуры штатного регулятора частоты вращения турбины в зависимости от режимов его работы, в том числе и коррекцию КПД гидроагрегата. Такой подход является новым с точки зрения построения САУ обратимых гидроагрегатов и позволяет повысить эффективность работы ГАЭС совместно с ВЭС и СЭС.

Список литературы

- International Renewable Energy Agency Renewable Capacity Statistics 2017. Available at: <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=3831> (accessed 12.01.2017).
- European network of transmission system operators for electricity. Statistics Available at: <https://www.entsoe.eu/publications/statistics/Pages/default.aspx> (accessed 30.03.2017).
- Мировая энергетическая статистика. Ежегодник 2016. Совокупное потребление энергии – Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru> – Дата обращения: 29 января 2017.
- Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Інформація щодо потужності та обсягів виробництва електроенергії об'єктами відновлюваної електроенергетики, які працюють за «зеленим» тарифом. – Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk/news/1545> – Дата звернення: 5 січня 2017.
- Артюх С. Ф. Предпосылки к созданию энергогенерирующих узлов гибридного типа на базе возобновляемых источников энергии / С. Ф. Артюх, К. В. Махотило, К. В. Сапельников // Научные работы ДонНТУ. Серия: «Электротехника і енергетика» 2015, № 17, С. 13-16.
- Ma T. Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong / T. Ma // Renewable energy. – 2014. – Т. 69. – Р. 7-15.
- Zhou W. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems / W. Zhou // Applied Energy. – 2010. – Т. 87. – № 2. – Р. 380-389.
- Tina G. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment / G. Tina, S. Gagliano, S. Raiti // Solar energy. – 2006. – Т. 80. – № 5. – С. 578-588.
- Papaefthymiou S. V. A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Icaria / S. V. Papaefthymiou // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2010. – Т. 1. – № 3. – С. 163-172.
- Anagnostopoulos J. S. Study of hybrid wind-hydro power plants operation and performance in the autonomous electricity system of Crete Island / J. S. Anagnostopoulos, D. E. Papantonis // Recent Advances in Energy, Environment and Economic Development.
- 50hertz. Grid Data. Available at: <http://www.50hertz.com/en/Grid-Data> (accessed 20.03.2017)
- Lopes J.A.P. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities / J. A. Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djaric, N. Jenkins // Electric power systems research. – 2007. – Т. 77. – № 9. – Р. 1189-1203.
- Ochoa L. F. Minimizing energy losses: Optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation / L. F. Ochoa, G. P. Harrison // IEEE Transactions on Power Systems. – 2011. – Т. 26. – № 1. – Р. 198-205.
- Keyhani A. Design of smart power grid renewable energy systems / A. Keyhani. – John Wiley & Sons, 2016.
- Diaf S. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system / S. Diaf et al. // Energy Policy. – 2007. – Т. 35. – № 11. – Р. 5708-5718.
- Koutroulis E. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms / E. Koutroulis et al. // Solar energy. – 2006. – Т. 80. – № 9. – Р. 1072-1088.
- Yang H. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system / H. Yang, L. Lu, W. Zhou // Solar energy. – 2007. – Т. 81. – № 1. – С. 76-84.
- Lim J. H. Optimal combination and sizing of a new and renewable hybrid generation system / J. H. Lim // International Journal of Future Generation Communication and Networking. – 2012. – Т. 5. – № 2. – С. 43-59.
- Energy Storage Association. Pumped Hydroelectric Storage. Available at: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/pumped-hydroelectric-storage> (accessed 07.02.2017).
- Arsie I. A model of a hybrid power plant with wind turbines and compressed air energy storage / I. Arsie et al. // ASME 2005 Power Conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2005. – Р. 987-1000.
- Червоненко І.І. Структурний синтез системи автоматичного управління оборотних гідроагрегатів, які працюють зі змінною частотою обертання: дис... канд. техн. наук.: 05.13.07 / Червоненко Іван Ігорович – НТУ «ХПІ», 2016. – 140 с.
- Артюх С.Ф. Заощадження енергоресурсів за рахунок підвищення ефективності використання гідроагрегатів при їх роботі зі змінною частотою обертання / С.Ф. Артюх, І.І. Червоненко // Енергетика, економіка, технології, екологія. Науковий журнал. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – №2(36). – С. 7-10.
- Артюх С. Ф. Повышение энергоэффективности гидроаккумулирующих электростанций / С. Ф. Артюх, В. В. Галат, В. В. Кузьмин, И. И. Червоненко, Ю. Г. Шакарян, П. В. Сокур // Электрические станции. – 2014. – № 8. – С. 33-37.
- Artyukh S. F. Improving the energy efficiency of Pumped-storage power plants / S. F. Artyukh, V. V. Galat, V. V. Kuz'min, I. I. Chervonenko, Yu. G. Shakaryan, and P. V. Sokur // Power Technology and Engineering. – 2015. – № 5. – pp. 396-399.
- Merino J. M. Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant / J. M. Merino, A. Lopez // ABB Review. – 2012. – № 3. – Р. 33-38.
- Yanagisawa T. Transient Analysis of Converter-Fed Adjustable Speed Generator-Motor for the Pumped Storage Power Plant / T. Yanagisawa, T. Kageyama, K. Okamura, K. Kusunoki, T. Taguchi, M. Abe, H. Kaneko // Electrical Engineering in Japan. – 1996. – Vol. 116, Issue 2. – Р. 63-76.
- Лабунец І. А. Опыт эксплуатации и перспективы применения в энергосистемах России мощных асинхронизированных турбогенераторов / И. А. Лабунец, Ю.Г. Шакарян, В.Е. Знаков // М.: Электро. – 2000. – №2. – С. 9-17.
- Шакарян Ю. Г. Асинхронизированные синхронные машины Т. 2. / Ю.Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.
- Сидельников Б. В. Обоснование и разработка рациональной конструкции обмотки возбуждения асинхронизированных генератор-двигателей с целью повышения их энергоэффективности и эксплуатационной надежности / Б. В. Сидельников, И. К. Кобяков // Технично-технологические проблемы сервиса. – 2014. – № 4 (30). – с. 30-37.
- Мещераков В. Н. Возможности машины двойного питания в отношении двухзонного регулирования / В. Н. Мещераков, Д. В. Безденежных // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 26-29.
- Артюх С. Ф. Синтез системы управления оборотными гидроагрегатами ГАЭС, які працюють зі змінною частотою обертання / С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 3. – С. 86-90.
- Артюх С. Ф. Определение точности моделирования системы управления обратимыми гидроагрегатами Днестровской ГАЭС / С. Ф. Артюх, И. И. Червоненко, С. В. Борщев // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип.: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 3 (1175). – С. 3-9.
- Червоненко І.І. Исследование динамических свойств системы управления обратимых гидроагрегатів, работающих с переменной частотой вращения / И.И. Червоненко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков. – 2015, № 3/2 (75). – С. 60-65.

References (transliterated)

- International Renewable Energy Agency Renewable Capacity Statistics 2017. Available at: <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=3831> (accessed 12.01.2017).
- European network of transmission system operators for electricity. Statistics Available at: <https://www.entsoe.eu/publications/statistics/Pages/default.aspx> (accessed 30.03.2017).
- Mirovaya energeticheskaya statistika. Ezhegodnik 2016. Sovokupnoe potreblenie ehnergii [World energy statistics. Yearbook 2016. Total energy consumption] Available at: <https://yearbook.enerdata.ru>. (accessed 29.01.2017).
- Derzhavne agenstvo z energoefektivnosti ta energozberezheniya Ukraïni. Informaciya shchodo potuzhnosti ta obsyagiv virobniatva elektroenerhii ob'ektami vidnovlyuvanoi elektroenerhiki, yaki pracuyut' za «zelenim» tariffom. [The state Agency on energy efficiency and energy saving of Ukraine. Information on capacity and volumes of electricity generation by renewable electricity, which work under "green" tariff]. Available at: <http://saee.gov.ua/uk/news/1545> (accessed 05.01.2017).
- Artyuh S. F., Mahotilo K. V., Sapel'nikov K. V. Predposylki k sozdaniyu ehnergoeneriruyushchih uzlov gibridnogo tipa na baze vozobnovlyаемых istochnikov ehnergii [Preconditions for the creation of power generating nodes hybrid type on the basis of renewable energy sources]. *Naukovi praci DonNTU. Seriya: «Elektrotehnika i energetika»*. 2015, no. 17, pp. 13-16.
- Ma T. Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong. *Renewable energy*. 2014, T. 69, pp. 7-15.
- Zhou W. Current status of research on optimum sizing of standalone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*. 2010, T. 87, no. 2, pp. 380-389.
- Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. *Solar energy*. 2006, T. 80, no. 5, pp. 578-588.
- Papaefthymiou S. V. A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Ikaria. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2010, T. 1, no. 3, pp. 163-172.
- Anagnostopoulos J. S., Papantonis D. E. Study of hybrid wind-hydro power plants operation and performance in the autonomous electricity system of Crete Island. *Recent Advances in Energy, Environment and Economic Development*.
- 50hertz. Grid Data. Available at: <http://www.50hertz.com/en/Grid-Data> (accessed 20.03.2017).
- Lopes J. A. P., Hatzigiorgiou N., Mutale J., Djapic P., Jenkins N. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric power systems research*. 2007, T. 77, no. 9, pp. 1189-1203.
- Ochoa L. F., Harrison G. P. Minimizing energy losses: Optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2011, T. 26, no. 1, pp. 198-205.
- Keyhani A & Sons. Design of smart power grid renewable energy systems. 2016.
- Diaf S. et al. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy*. 2007, T. 35, no. 11, pp. 5708-5718.
- Koutroulis E. et al. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms // *Solar energy*. 2006, T. 80, no. 9, pp. 1072-1088.
- Yang H., Lu L., Zhou W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system. *Solar energy*. 2007, T. 81, no. 1, pp. 76-84.
- Lim J. H. Optimal combination and sizing of a new and renewable hybrid generation system. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2012, T. 5, no. 2, pp. 43-59.
- Energy Storage Association. Pumped Hydroelectric Storage. Available at: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/pumped-hydroelectric-storage> (accessed 07.02.2017).
- Arsie I. et al. A model of a hybrid power plant with wind turbines and compressed air energy storage. *ASME 2005 Power Conference. – American Society of Mechanical Engineers*. 2005, pp. 987-1000.
- Chervonenko I.I. *Strukturnij sintez sistemi avtomatichnogo upravlinnya oborotnih gidroagregativ, yaki pracuyut' zi zminnoyu chastotoyu obertannya dis. ... kand. tekhn. nauk*. 05.13.07 [Structural synthesis of automatic control system reversible hydraulic units working with variable speed Candidateeng. sci. diss.(Ph. D.)]. NTU «HPI», 2016.140 p.
- Artyuh S.F., Chervonenko I.I. Zaoshchadzhennya energoresursiv za rahunok pidvishchennya efektyvnosti vikoristannya gidroagregativ pri ih roboti zi zminnoyu chastotoyu obertannya [Energy savings by improving the efficiency of generating units in operation with variable speed]. *Energetika, ekonomika, tekhnologii, ekologiya. Naukovij zhurnal*. 2014, no. 2(36), pp. 7-10.
- Artyuh S. F., Galat V. V., Kuz'min V. V., Chervonenko I. I., Shakaryan YU. G., Sokur P. V. Povyshenie ehnergoehffektivnosti gidroakkumuliruyushchih ehlektrostantsij [The energy efficiency of pumped storage plants]. *Elektricheskie stancii*. 2014, no. 8, pp. 33–37.
- Artyukh S. F., Galat V. V., Kuz'min V. V., Chervonenko I. I., Shakaryan Yu. G., and Sokur P. V. Improving the energy efficiency of Pumped-storage power plants. *Power Technology and Engineering*. 2015, no. 5, pp. 396-399.
- Merino J. M., Lopez, A. ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant. *ABB Review*. 1996, no. 3, pp 33–38.
- Yanagisawa T. Kageyama T., Okamura K., Kusunoki K., Taguchi T., Abe M., Kaneko H. Transient Analysis of Converter-Fed Adjustable Speed Generator-Motor for the Pumped Storage Power Plant. *Electrical Engineering in Japan*. 1996. Vol. 116, Issue 2, pp. 63-76.
- Labunec I. A. Shakaryan YU.G., Zinakov V.E. Opyt ehkspluatatsii i perspektivy primeneniya v ehnergosistemah Rossii moshchnyh asinhronizirovannyh turbogeneratorov [Operation experience and perspectives of application in power systems of Russia powerful asynchronousized turbogenerators]. *Elektro*. 2000, no. 2. pp. 9-17.
- Shakaryan YU. G. *Asinhronizirovannye sinhronnye mashiny* [Asynchronousized synchronous machine]. Moscow, EHnergoatomizdat. 1984. T. 2, 192 p.
- Sidel'nikov B. V., Kobyakov I. K. Obosnovanie i razrabotka racional'noj konstrukcii obmotki vobuzhdeniya asinhronizirovannyh generator-dvigatel'ej s cel'yu povysheniya ih ehnergoehffektivnosti i ehkspluatatsionnoj nadezhnosti [Substantiation and development of rational design of the field winding of asynchronousized generator-engines with the aim of improving their energy efficiency and operational reliability]. *Tekhniko-tehnologicheskije problemy servisa*. 2014, no. 4 (30). pp. 30-37.
- Meshcheryakov V. N., Bezdenezhnyh D. V. Vozmozhnosti mashiny dvojnogo pitaniya v otnoshenii dvuhzonnogo regulirovaniya [The machine dual power supply in respect of two-zone regulation]. *Elektrotekhnicheskie komplekxy i sistemy upravleniya*. 2010, no. 1, pp. 26-29.
- Artyuh S. F., Chervonenko I. I. Sintez sistemi upravlinnya oborotnimi gidroagregatami GAES, yaki pracuyut' zi zminnoyu chastotoyu obertannya [The synthesis of a control system reversible hydroelectric pumped storage plant that operate with variable speed]. *Visnik Vinnic'kogo politekhnichnogo institutu*. 2015, no. 3, pp. 86-90.
- Artyuh S. F., Chervonenko I. I., Borshchev S. V. Opredelenie tochnosti modelirovaniya sistemy upravleniya obratimymi gidroagregatami Dnestrovskoj GAEHS [Determination of the accuracy of the simulation of the control system reversible hydraulic units of the Dniester PSP]. *Visnik Nac. tekhn. un-tu "HPI" : zb. nauk. pr. Temat. vip. : Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist'.* – Harkiv : NTU "HPI", 2016, no. 3 (1175), pp. 3-9.
- Chervonenko I.I. Issledovanie dinamicheskikh svojstv sistemy upravleniya obratimyh gidroagregatov, rabotayushchih s peremennoj chastotoj vrashcheniya [Study of dynamic properties of the control system reversible hydraulic units working with variable speed]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij*. 2015, no. 3/2 (75), pp. 60-65.

Поступила (received) 25.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Створення ефективних енергогенеруючих вузлів, які об'єднують станції на поновлюваних джерелах енергії / К. В. Махотіло, І. І. Червоненко, В. С. Кулешов, К. В. Кулешова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 90–96. – Библиогр.: 33 назв. – ISSN 2409-9295.

Создание эффективных энергогенерирующих узлов, объединяющих станции на возобновляемых источниках энергии / К. В. Махотило, И. И. Червоненко, В. С. Кулешов, К. В. Кулешова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 90–96. – Библиогр.: 33 назв. – ISSN 2409-9295.

Creation of efficient power generating nodes uniting renewable energy power plants / K. V. Makhotilo, I. I. Chervonenko, V. S. Kuleshov, K. V. Kuleshova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 90–96. – Bibliogr.: 33. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Махотіло Костянтин Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних станцій, тел. (057) 707-65-45; e-mail: kvmahotilo@gmail.com.

Махотило Константин Владимирович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры электрических станций, тел. (057) 707-65-45; e-mail: kvmahotilo@gmail.com.

Makhotilo Kostiantyn Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of the Department of Electric Power Stations, (057) 707-65-45; e-mail: kvmahotilo@gmail.com.

Червоненко Іван Ігорович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних станцій, тел. (057) 707-62-76; e-mail: iichervonenko@gmail.com.

Червоненко Иван Игоревич – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры электрических станций, тел. (057) 707-62-76; e-mail: iichervonenko@gmail.com.

Chervonenko Ivan Igorevych. – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Lecturer at the Department of Electric Power Stations, (057) 707-62-76; e-mail: iichervonenko@gmail.com.

Кулешов Владислав Сергійович – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», (099) 310-99-50; e-mail: k.v.serheevich@gmail.com.

Кулешов Владислав Сергеевич – студент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», (099) 310-99-50; e-mail: k.v.serheevich@gmail.com.

Kuleshov Vladislav Sergeevych – student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», (099) 310-99-50; e-mail: k.v.serheevich@gmail.com.

Кулешова Христина Володимирівна – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», (099) 310-99-50; e-mail: kuleshova.kv@gmail.com.

Кулешова Кристина Владимировна – студент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», (099) 310-99-50; e-mail: kuleshova.kv@gmail.com.

Kuleshova Kristina Volodymyrovna – student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», (099) 310-99-50; e-mail: kuleshova.kv@gmail.com.