

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ*

Рассмотрена возможность электрификации труднодоступных районов с помощью свободнопоточных микроГЭС, для компонентов которых разработаны математические модели, проверена их адекватность стендовыми и натурными испытаниями; разрабатывается интегрированная среда проектирования и конструирования.

Ключевые слова: свободнопоточная микроГЭС, низкоскоростной синхронный генератор, ортогональная турбина, САД, САЕ, САМ.

В связи с интенсивным освоением природных ресурсов, удаленностью населенных пунктов от централизованных источников электроснабжения, в Сибирском регионе сложился большой дефицит энергетических мощностей на значительной части территории Красноярского края. Удовлетворить потребности в электроэнергии средствами большой энергетики в ряде случаев экономически и технически нецелесообразно. Эта проблема для ЖКХ и малых сельхозпредприятий может быть решена развитием малой энергетики с использованием богатых водных ресурсов.

Варианты использования водных ресурсов для этой цели: низконапорные, деривационные, свободнопоточные микроГЭС. Первые два типа микроГЭС позволяют генерировать мощности до 200 кВт, но реализуются по индивидуальным проектам с выполнением большого объема работ по возведению плотины и (или) сооружению рукава. Это значительно увеличивает стоимость и сроки реализации проекта, часто приводящего к экологическому ущербу.

Свободнопоточные микроГЭС не наносят экологического ущерба, имеют минимальную стоимость 1 кВт установленной мощности и 1 кВт·ч производимой энергии, мобильны, практически не требуют земляных работ.

Нашим коллективом разработана конструкция свободнопоточной погружной микроГЭС [1], в качестве базовых элементов которой используются низкоскоростной синхронный генератор (НТСГ) новой конструкции [2] и ортогональная турбина, обладающая большей удельной мощностью и быстроходностью. Применение этих двух агрегатов позволяет осуществить прямой привод от турбины, что обеспечивает надежную работу погружной микроГЭС. Этот тип изделия, преобразующего кинетическую энергию свободного потока воды в электроэнергию, имеет свою нишу на рынке, обусловленную его гидрологическими и техническими возможностями.

Рынок микроГЭС. Характеристики ниши свободнопоточных микроГЭС следующие: единичная мощность – до 50 кВт, скорость потока воды – не менее 1,6 м/с, глубина в месте установки – не менее 1,8 м (при ледоставе – до нижней кромки льда), ширина водного потока в месте установки – не менее 2,5 м при указанной глубине, расстояние потребителя от места установки – до 200 м.

Комплекс предварительных маркетинговых и гидрологических исследований в Красноярском крае и Респуб-

лике Алтай, выполненный коллективом в 2005–2009 гг., позволил оценить параметры рынка микроэнергетики, необходимые для определения наиболее востребованных мощностей и масштабов производства нового продукта – погружных свободнопоточных микроГЭС с динамикой их выпуска по годам.

В Красноярском крае неэлектрифицированы и недостаточно электрифицированы Северная, Приангарская, Южная группы районов. Дефицит электроэнергии здесь составляет не менее 50 %. Неудовлетворенная потребность в электроэнергии по Нижнему Приангарью составляет на данный момент до 150 МВт, а с учетом тенденций развития региона – до 500 МВт.

Республика Алтай привлекательна для инвестиций и располагает 2/3 всех гидроресурсов Западной Сибири, гидроэнергетический потенциал региона оценивается в десятки миллиардов кВт·ч в год. В то же время Республика Алтай – один из немногих регионов РФ, который не производит в заметных количествах электроэнергию, и уже ощущает ее дефицит, особенно в зимние месяцы максимума потребления электроэнергии [3].

Несмотря на различия в энергоснабжении, этим двум регионам, как и всему Сибирскому региону, присуща общая проблема [4] – наличие большого числа неэлектрифицированных и недостаточно электрифицированных населенных пунктов.

Для этих условий необходимо развитие малой гидроэнергетики. Суммарная потребность в электроэнергии, которая может быть удовлетворена за счет внедрения объектов малой гидроэнергетики, в частности, микроГЭС, в Красноярском крае и Алтайском регионе, составляет от 529 до 578 МВт.

Однако далеко не всякое речное русло обеспечивает необходимые гидротехнические показатели, соответствующие требованиям установки агрегата. Поэтому необходимо выявить места конкретных установочных точек вида «река – населенный пункт», для установки свободнопоточных микроГЭС с учетом требований к ним, изложенных в статье.

Исследования выполнены по рекам Красноярского края, республикам Хакасия, Тува и Алтай.

Решающим критерием отбора объекта является его доступность: наличие автодорог и (или) возможность, сроки доступа к нему речным путем (по данным Енисей-

* Работы в 2010 г. выполнялись по проекту № КФ56 КГАУ ККФПНиНТД.

ского речного пароходства) для доставки изделия к месту установки.

В Ермаковском районе находится уникальный природный парк «Ергаки». Важнейшей задачей при развитии парка является энергообеспечение хозяйственных объектов и инфраструктуры природного парка (ПП) «Ергаки» автономными энергоустановками при обеспечении экологической безопасности. Решая эту задачу, можно в ПП создать демонстрационную зону использования экологически чистых источников энергии: свободнопоточных и деривационных микроГЭС, ветроэнергоустановок.

Экономическая целесообразность выбора как типа микроГЭС, так и ее основных параметров, может быть оценена по разработанным коллективом расчетным моделям, после локализации мест установки и требований заказчика по прогнозируемому энергопотреблению.

В результате многолетних исследований коллективом созданы математические модели рабочих процессов: гидродинамики ортогональной турбины и ее энергетики, электромагнитных процессов в НТСГ, **работоспособности изделия. Без реализации этого этапа невозможно проектирование микроГЭС для конкретных условий.**

Синтез параметров турбины. Для условий свободного потока лучшим КПД и достаточно высокой энергетикой при простоте конструкции обладает ортогональная турбина. В ортогональной турбине скорость движения лопасти в несколько раз превышает скорость набегающего на нее потока.

Структурная схема математической модели приведена на рис. 1.

Математическая модель энергетики и кинематики ортогональной гидротурбины представляет собой совокупность аналитических методов, реализованных программно, и численных методов, реализованных в ANSYS

CFX. Она позволяет синтезировать по потребляемой мощности и гидрологии потока, рассчитать основные параметры турбины, а затем оптимизировать геометрию лопастей.

Энергетические характеристики турбины зависят от сил, действующих на ее лопасти. Разработанная математическая модель основана на определении тянущей силы лопасти, возникающей вследствие наклона вектора подъемной силы крыла по отношению к ее хорде при ненулевых углах атаки.

Коэффициенты лобового сопротивления C_x , подъемной силы C_y , аэродинамического момента C_m смещения центра давления C_d определяются углом атаки α . По результатам численных экспериментов в Ansys CFX (рис. 2) определяются сила лобового сопротивления F_x , подъемная сила лопасти F_y , аэродинамический момент M_z .

Коэффициент тянущей силы C_t с учетом фактического положения центра давления определяется следующим образом:

$$C_t = \frac{R_d}{R} (C_y \sin(\alpha - \gamma - \beta) - C_x \cos(\alpha - \gamma - \beta)), \quad (1)$$

где R – радиус вектор, определяющий положение центра хорды в полярной системе координат, связанной с осью вращения турбины; R_d – радиус-вектор, определяющий положение центра давления в полярной системе координат, связанной осью вращения турбины; γ – угол между R_d и R .

Определение энергетических характеристик турбины по этой методике сводится к вариации U в заданном диапазоне и определению коэффициента мощности:

$$C_n = \frac{C_t \cdot U \cdot W^2 \cdot S_l}{V^2 S_t}. \quad (2)$$

Объединив уравнение движения ортогональной турбины с результатами численного моделирования процесса



Рис. 1. Структура математической модели энергетики ортогональной турбины

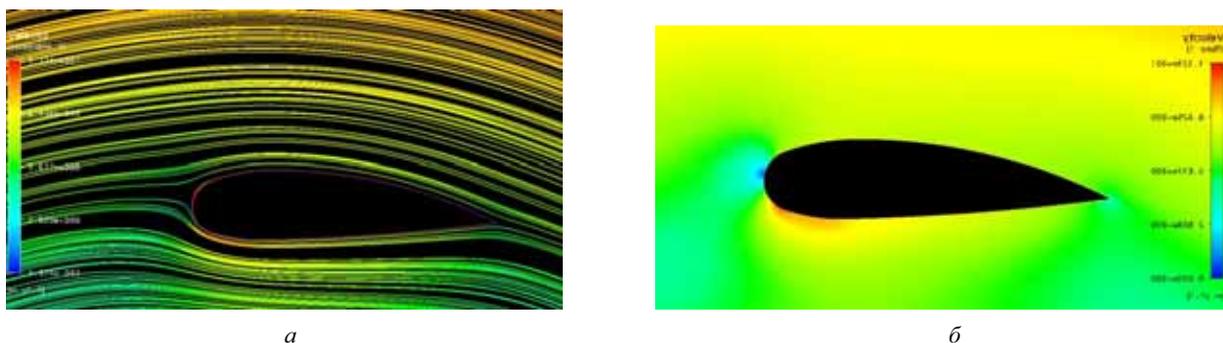


Рис. 2. Моделирование взаимодействия потока с лопастью в Ansys CFX: a – линии тока; b – поле скоростей

обтекания крыла, приходим к выводу, что эффективность работы крыла зависит от режима работы турбины.

Энергетическая эффективность турбины зависит от сочетания геометрических характеристик турбины, скорости реки и геометрии профиля лопасти. Выбор оптимальной комбинации этих параметров, как показали исследования, наиболее эффективен с применением генетического алгоритма [5].

Задача формализована так, что ее решение кодируется в виде вектора генов параметров лопасти ортогональной турбины, включающего длину хорды лопасти, максимальную толщину профиля, вогнутость профиля, размах крыла, положение максимальной толщины, ординаты точек верхнего и нижнего контуров профиля.

Задача поиска оптимального профиля формулируется как задача нахождения максимума функции приспособленности $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, описывающей мощность турбины.

Входными параметрами генетического алгоритма оптимизации профиля лопасти турбины, являются массив профилей крыла, каждый элемент которого это набор точек, описывающих геометрию профиля; доступное для поиска оптимального решения время либо требуемое значение коэффициента отбора мощности турбины; выходной поток данных модуля проектирования ортогональной турбины. Выходной поток данных – модифицированный набор точек геометрии лопасти.

В созданной среде автоматизированного моделирования рабочих процессов ортогональной турбины с использованием расчетных моделей в среде ANSYS CFX выполнен комплекс численных экспериментов по улучшению характеристик профиля лопасти и траверсы турбины, позволивший существенно повысить ее удельную мощность и устойчивость в режиме перегрузок.

Синтез параметров генератора. Особенностью свободнопоточной микроГЭС является низкая частота вращения турбины, определяемая скоростью свободного

потока воды в пределах 60–150 об/мин. Промышленность не выпускает ни обычных, ни герметичных генераторов мощностью до 50 кВт с такой частотой вращения.

Потребительские свойства микроГЭС во многом реализуются за счет НТСГ. Основные конструктивные особенности НТСГ: увеличение числа полюсов до 60, возбуждение от постоянных магнитов неодим–железо–бор больших энергий, надежная обмотка с рядовой укладкой проводников и изоляцией типа «моноклит», вдвоенная конструкция с разделенным статором. Все эти решения привели к снижению массогабаритных характеристик генератора и позволили применить эффективные технологии изготовления и сборки.

Отправным пунктом синтеза параметров НТСГ является создание математической модели электромагнитных процессов в нем, необходимой для поиска эффективного сочетания параметров генератора. В этой модели должны быть явно выражены функциональные взаимосвязи геометрических параметров генератора и его выходных характеристик [6].

Основа модели генератора – развертка машины с постоянными магнитами, пятизонная расчетная модель, а также общие решения уравнений магнитостатики для дискретно-однородной полосы с постоянными магнитами (рис. 3).

По полученным в [6] значениям магнитных индукций возбуждения B_{2y} и реакции якоря B_{3y} с учетом их пространственного сдвига на угол нагрузки Θ уравнение фазного тока статорной обмотки определится:

$$I_{\phi} = \frac{j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot B_{2y} \cdot l_{\delta} \cdot \tau}{r_1 + j \cdot x_{\lambda} + j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot l_{\delta} \cdot \tau \cdot u_{\text{псл}} \cdot (Y - X + Z) - z_H} \quad (3)$$

Числитель в выражении (3) представляет собой ЭДС магнитного поля ротора, тогда как синхронное индуктивное сопротивление имеет вид

$$x_d = j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot l_{\delta} \cdot \tau \cdot u_{\text{псл}} \cdot (Y - X + Z) + j \cdot x_{\lambda} \quad (4)$$

Основной характеристикой синхронного генератора с постоянными магнитами является зависимость выход-

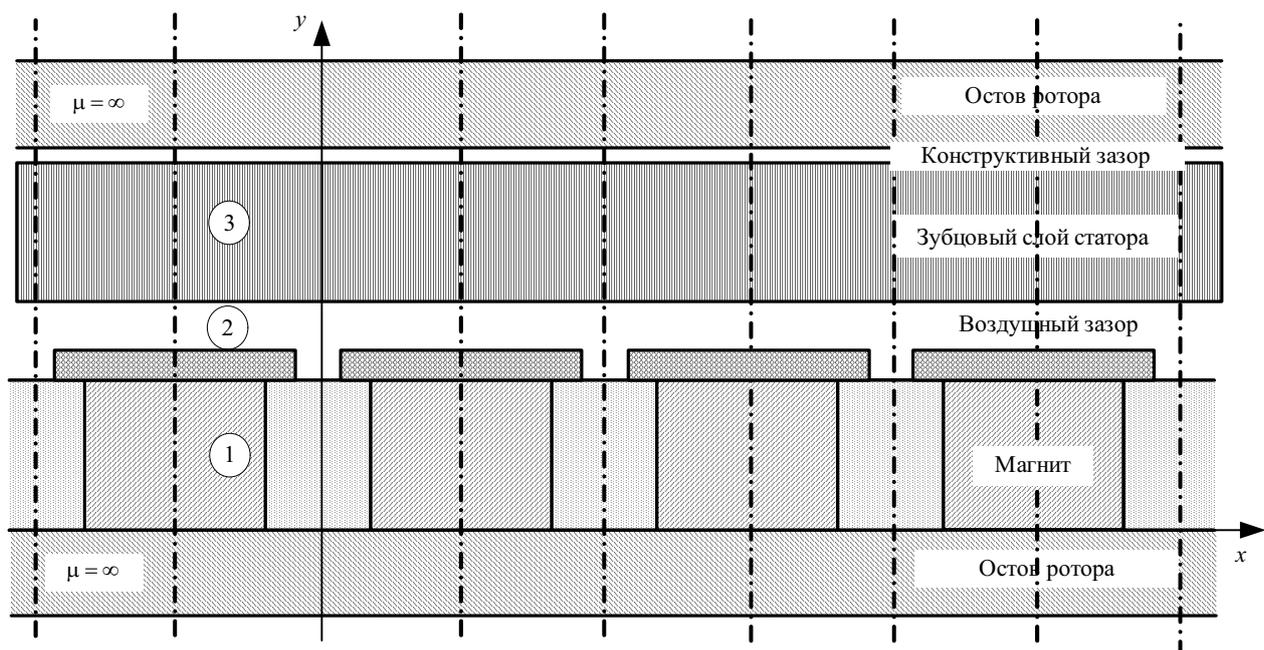


Рис. 3. Расчетная модель активной части генератора

ного напряжения генератора от тока якоря при постоянной угловой скорости вращения ротора и характере нагрузки ($U = f(I)$ при $\Omega = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$). Выражение для фазного тока (4) позволяет получить внешнюю характеристику генератора. Внешняя характеристика генератора $P = 1$ кВт представлена на рис. 4.

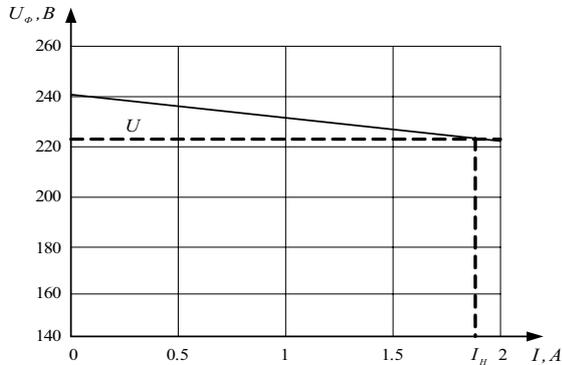


Рис. 4. Внешняя характеристика

Электромеханическая мощность, развиваемая ротором синхронной машины с беспазовым статором, равна приращению действительной части потока вектора Пойнтинга при переходе через границу ротор – воздушный зазор. После подстановки в выражение магнитной индукции реакции якоря и фазного тока (4) уравнение примет вид

$$P = 2p \cdot l_{\delta} \cdot v \cdot \operatorname{Re} \int_0^b \mu_0 \cdot u_{\text{псл}} \times \frac{j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot B_3 y \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{r_1 + j \cdot x_{\text{л}} + j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot S \cdot \mu_0 \cdot u_{\text{псл}} \cdot Y \cdot (X + Z) - z_{\text{H}}} \times Y \cdot (X + Z) \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot b}{\tau} + \Theta \right) \cdot H dx. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет анализировать влияние геометрических параметров на перегрузочную способность генератора.

Разработанная математическая модель обеспечивает хорошую сходимость расчетных и экспериментальных характеристик проектируемого генератора, позволяет добиться снижения массы и габаритов, повышения жесткости внешней характеристики.

Результаты стендовых испытаний образцов НТСГ доказали их работоспособность, соответствие техническим условиям (рис. 5). Очевидные резервы повышения эффективности НТСГ: увеличение сечения магнита при оптимальном его размещении в ограниченном пространстве; снижение пазового рассеяния.

Необходимость повышения единичной мощности микроГЭС (от 1–3 до 20–30 кВт), применение свободнопоточных микроГЭС на крутосклонных реках (с увеличенной скоростью течения до 3,5–5 м/с) требуют новых конструктивных решений, коррекции математических моделей электромагнитного расчета торцевого генератора.

Испытания генератора и микроГЭС. Адекватность математической модели генератора подтверждена его стендовыми испытаниями (рис. 6). Исследования работоспособности образца НТСГ из установочной партии подтвердили соответствие его характеристик требованиям технического задания и технических условий, что позволяет вести работы по его сертификации.

Корректность модели турбины подтверждена натурными испытаниями опытных образцов микроГЭС мощностью 1, 3 и 10 кВт, трех образцов установочной партии микроГЭС мощностью 1 кВт.

Стендовые испытания генераторов и натурные испытания микроГЭС свидетельствуют о соответствии изделий требованиям технического задания и технических условий, подтверждают правильность основных конструктивных решений.

Автоматизация проектирования и анализа работоспособности. Обеспечить работоспособность микроГЭС в целом и ее компонентов на этапе проектирования невозможно без использования сочетания САД- и САЕ-систем. Использование этих информационных технологий позволяет сократить сроки и трудоемкость проектирова-



Рис. 5. Исследование на стенде характеристик НТСГ

ния, обеспечить качество изделия, избежать многих ошибок, осуществлять гибкую корректировку проекта в ходе его выполнения. Примером такого комплекса программ является сочетание SolidWorks, Ansys Multiphysics и Ansys CFX под интерфейсом Workbench.

Впервые была предложена модель анализа силового взаимодействия системы ротор–статор, проверена ее корректность в физическом эксперименте на опытном образце НТСГ.

Сила тяжения ротора к статору рассчитывается по формуле

$$F = \frac{B_y^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot l_8 \cdot \tau, \quad (6)$$

где B_y – сумма векторов магнитной индукции реакции якоря B_{3y} и ротора B_{2y} .

Наиболее сложной задачей является вычисление суммарной погрешности обработки. Это объясняется недостаточным количеством данных по элементарным погрешностям обработки, отсутствием частных методик по расчету технологических процессов по критерию точности. Поэтому технологу в некоторых случаях приходится самостоятельно разрабатывать план и анализировать результаты. В наиболее сложных случаях для снижения трудоемкости расчет целесообразно выполнять на вычислительных машинах.

С учетом конкретных значений влияния отдельных факторов на перепад воздушного зазора суммарный допуск вероятностным методом можно записать следующим образом:

$$\Delta \Sigma_{\text{ротор}} = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{i=1}^6 (K_i \cdot \Delta_i)}. \quad (7)$$

где Δ_i – величина перепада воздушного зазора из-за i -го фактора. Поскольку точность обработки ротора соответствует нормальному закону распределения погрешностей, то коэффициенты K_i можно принять равными 1.

Изменение значения K позволяет определить вероятность брака. В серийном производстве перепад зазора за счет погрешностей изготовления ротора не должен превысить 0,1 мм. Это значение следует принять за основу при вычислении силы тяжения в расчете напряженно-деформированного состояния генератора, в действительности в большинстве экземпляров торцевой электрической машины этот перепад будет ниже.

Результаты исследования расчетной модели силового взаимодействия системы статор–ротор показали, что деформации диска ротора зависят от величины воздуш-

ного зазора, рассчитанного для уровня, совпадающего с центром масс магнитов. В свою очередь следствием деформаций диска является переменный воздушный зазор между ротором и статором, что оказывает влияние на величину силы тяжения, а еще на изменение воздушного зазора влияет погрешности изготовления конструкции и сборки узла.

В CAD-среде создана расчетная твердотельная модель исследуемой торцевой машины, полученная на основе реальной конструкции этой сборочной единицы, которая позволяет дискретизировать по полусам переменную по величине силу тяжения, передаваемую в САЕ-среду ANSYS. Габаритные размеры и топология расчетной модели эквивалентны реальным размерам ротора и статора.

Разработанная расчетная модель для определения величины воздушного зазора в силу постановки, максимального учета действующих факторов влияния и обоснованного выбора модельных параметров и возможностей программной среды позволяет получить достоверные данные о величине воздушного зазора между дисками ротора и статора, а также о прочности элементов конструкции.

Для повышения точности и достоверности результатов анализа работоспособности элементов НТСГ разработана комплексная модель, позволяющая учесть не только электромагнитное воздействие, но и весь комплекс технологических погрешностей (погрешности изготовления ротора генератора, деформации диска ротора, деформации корпуса и щитов, податливость подшипниковых опор), влияющих на взаимодействие системы ротор–статор. Это позволило обосновать назначение технологических допусков и прогнозировать работоспособность НТСГ.

Выполнен комплекс исследований механической работоспособности компонентов микроГЭС с верификацией этих моделей средствами численного моделирования в ANSYS и физических экспериментов.

Для сокращения времени от заказа до производства создается интегрированная система, включающая централизованное хранилище данных, базы конструкторских и технологических данных, CAD/CAE/CAM/PLM-комплекс программ, который частично уже апробирован и используется. Интегрированная среда должна быть сдана в эксплуатацию в 2011 г.

С 2011 г. планируется провести технологическую подготовку промышленного производства микроГЭС на ФГУП «НПП «Радиосвязь» и начать выпуск сертифицированных свободнопоточных микроГЭС мощностью 3 и 5 кВт.



Рис. 6. Натурные испытания микроГЭС на Енисее

Выводы. Исследования рынка малой энергетики и гидрологии рек Сибири свидетельствуют о целесообразности выпуска сотен микроГЭС в год.

Коллективом созданы математические модели рабочих процессов, методики расчета, конструкции, **необходимые для коммерциализации проекта.**

Неоднократно подтверждена корректность и точность разработанных моделей и методик проектирования, соответствие характеристик разработанных микроГЭС их расчетным параметрам.

Создается интегрированная система, включающая централизованное хранилище данных, базы конструкторских и технологических данных, CAD/CAE/CAM/PLM-комплекс программ, которая вместе с повышением качества проектирования позволяет существенно сократить время от заказа до производства изделия.

Библиографические ссылки

1. Торцевая электрическая машина : пат. 2246167. Российская Федерация / Встовский А. Л., Головин М. П.,

Встовский С. А. и др. МПК⁷ H 02 K 21/24 № 2003123587/09; заявл. 24.07.03; опубл. 10.02.05, Бюл. № 4.

2. Погружная свободнопоточная микрогидроэлектростанция : пат. 2247859. Российская Федерация / Головин М. П., Встовский А. Л., Головина Л. Н. и др. МПК⁷ F 03 B 13/00 № 2003127811/06; заявл. 15.09.03; опубл. 10.03.05, Бюл. № 7.

3. Развитие энергетического потенциала Республики Алтай – основа ее экономического благополучия : сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.altai-republic.com/>

4. О проекте Энергетической стратегии России на период до 2030 г. : доклад Министра энергетики Российской Федерации С. И. Шматко на заседании Правительства РФ. М., 27 авг. 2009.

5. Калиткин Н. Н. Численные методы. М. : Наука, 1978.

6. Федий К. С., Встовский А. Л. Анализ и расчет синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов // Оптимизация режимов работы электротехнических систем : межвуз. сб. науч. тр. / ИПЦ КГТУ. Красноярск, 2006.

М. P. Golovin, A. L. Vstovski, E. A. Spirin, K. A. Fedy, L. N. Golovina

PROSPECTS FOR USE OF SMALL HYDROPOWER IN THE SIBERIAN REGION

The authors consider possibility of electrification of frontier areas by means of free flow micro GPS, offer mathematical models for components of such micro GPS, verify adequacy of the models in the process of bench and field tests and develop an integrated design environment.

Keywords: free flow micro GPS, low speed generator, orthogonal turbine, CAD, CAE, CAM.

© Головин М. П., Встовский А. Л., Спиринов Е. А., Федий К. А., Головина Л. Н., 2010

УДК 338.242(571.51)

Е. В. Кашина, Е. В. Бочарова

ОЦЕНКА РЫНОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА СВОБОДНОПОТОЧНЫХ МИКРОГЭС НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ*

Рассмотрены внешние факторы, определяющие целесообразность использования микроГЭС. Проведено обследование территорий Красноярского края, потенциально пригодных для использования микроГЭС. Определен рынок первоочередной реальной малой гидроэнергетики в Красноярском крае.

Ключевые слова: рыночный потенциал, Красноярский край, свободнопоточная микроГЭС.

Сущность региональной энергетической политики заключается в создании условий для стабильного, эффективного и надежного энергоснабжения потребителей всех регионов при минимальных затратах на производство, преобразование, транспорт и потребление энергоносителей и приемлемом уровне техногенного воздействия на окружающую природную среду.

Решение социальных проблем, или повышение уровня и качества жизни населения, часто выдвигается на первый план в качестве главного приоритета энергетической политики. Нет возражений против того, чтобы решение этой задачи «пронизывало» всю энергопрограмму. Однако же представляется разумным, чтобы программа решала, прежде всего, задачу энергоэффективности, про-

*Работа выполнена при финансовой поддержке Краевого государственного автономного учреждения «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности».