

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/FYZZ1289>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А. Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/HRSB4057>

***А. К. Танкибаева¹, И. Г. Казанцев², С. К. Кумаргажанова³,
А. С. Тлебалдинова⁴, Ж. К. Азаматова⁵**

^{1,3,4,5}Восточно-Казахстанский технический университет

имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск

²Институт вычислительной математики и математической геофизики

Сибирского отделения Российской академии наук,

Российская Федерация, г. Новосибирск

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6053-4775>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8479-7349>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-4023>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1271-0352>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6214-9913>

*e-mail: tankibaeva_akerke@mail.ru

ОБЗОР МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ НЕОДНОРОДНОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В статье рассматриваются современные методы коррекции неоднородности интенсивности, возникающей в процессе магнитно-резонансной визуализации. Неоднородность интенсивности, вызванная различными факторами, значительно усложняет автоматический анализ магнитно-резонансных изображений (МР-изображений). В работе представлены наиболее популярные математические модели, используемые для коррекции данного артефакта, такие как низкочастотная модель, модель гиперповерхности и статистическая модель. Проведен сравнительный анализ этих методов с учетом их эффективности и вычислительной сложности. Полученные результаты могут быть использованы для разработки более точных и надежных методов компьютерной диагностики на основе МР-изображений.

В связи с частым применением метода магнитно-резонансной томографии для клинической диагностики, значительное внимание уделяется автоматическому анализу полученных изображений с использованием методов компьютерного зрения и распознавания

образов. При разработке таких инструментов компьютерной диагностики часто встречающейся проблемой является коррекция неоднородности интенсивности на МР-изображениях.

Неоднородность интенсивности возникает в результате влияния таких факторов как неравномерное статическое магнитное поле, вихревой ток, образованный градиентным полем, и неравномерная чувствительность приемной катушки. Данное явление часто называется артефактом МР-изображения, а также известно как поле смещения. Поле смещения представляет собой низкочастотный, гладкий сигнал который оказывает деструктивное воздействие на МР-изображения и является основным препятствием для обработки изображений и дальнейшей компьютерной диагностики. Для того чтобы исправить поля смещения на МР-изображении необходимо выполнить этап предварительной обработки, в результате которого будет выполнена коррекция неоднородности интенсивности изображения.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, неоднородность интенсивности, сегментация, поле смещения.

Введение

В связи с частым применением метода магнитно-резонансной томографии для клинической диагностики, значительное внимание уделяется автоматическому анализу полученных изображений с использованием методов компьютерного зрения и распознавания образов. При разработке таких инструментов компьютерной диагностики часто встречающейся проблемой является коррекция неоднородности интенсивности на магнитно-резонансных изображениях.

Целью исследования является проведение обзора и анализа современных методов коррекции неоднородности интенсивности магнитно-резонансных изображений (МР-изображений) для повышения качества автоматического анализа медицинских данных в контексте компьютерной диагностики.

Научная новизна исследования заключается в систематизации и сравнительном анализе различных подходов к математическому моделированию и устранению неоднородности интенсивности МР-изображений, с акцентом на их интеграцию в комплексные системы компьютерной диагностики, что позволит улучшить точность и надежность сегментации и регистрации изображений.

Неоднородность интенсивности, также известная как поле смещения или усиления, обычно описывает медленные неанатомические изменения интенсивности в пределах одной и той же ткани на изображении. Такие

искажения могут быть вызваны особенностями работы визуализационного оборудования, например, неоднородностью радиочастотного или статического поля, а также движением пациента во время съемки. Этот артефакт особенно заметен на МР-изображениях, полученных с помощью поверхностных катушек. Два реальных МР-изображения с тяжелым артефактом неоднородности интенсивности показаны на рисунке 1 (а), где видно, что для пикселей одной и той же ткани интенсивность значительно различается, а между пикселями разных тканей значения интенсивности заметно перекрываются. Для сравнения на рис. 1(б) приведены изображения с неоднородностью интенсивности, скорректированной методом аппроксимации поверхности [1, с. 153-165], на которых хорошо видно улучшение качества изображения. Расчетные карты неоднородностей интенсивности приведены на рисунке 1(с).

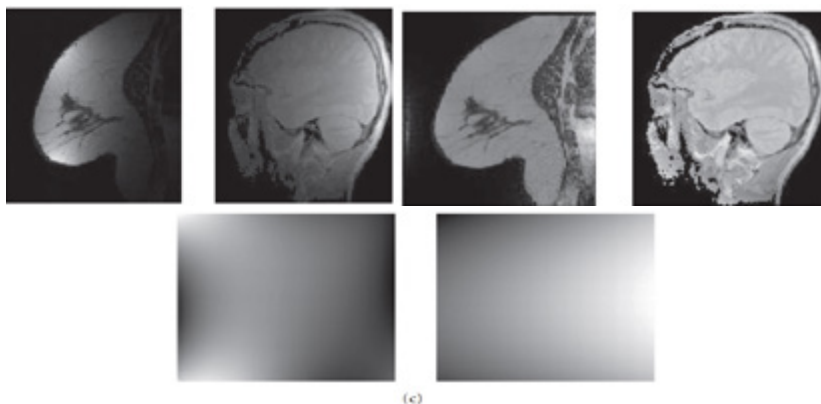


Рисунок 1 – Примеры МР-изображений с серьезной неоднородностью интенсивности: исходные изображения (а), скорректированные изображения (б) и расчетные карты неоднородности (с).

Пусть x обозначает измеренную интенсивность, а x' – истинную интенсивность. Тогда наиболее популярной моделью для описания эффекта неоднородности интенсивности является

$$x = \alpha x' + \xi, \quad (1)$$

где α обозначает эффект неоднородности интенсивности, а ξ – шум.

На рисунке 2 представлены широко используемые МР-изображения, смоделированные с помощью BrainWeb. Изображение 2(а) демонстрирует

исходное изображение, изображение 2(b) – с артефактом неоднородности интенсивности, изображение 2(c) – с шумом, а изображение 2(d) – с сочетанием артефакта неоднородности интенсивности и шума. Эти примеры позволяют увидеть визуальные различия, вызванные влиянием неоднородности интенсивности и шумов. Чтобы упростить вычисления, часто пренебрегают шумом и применяют логарифмическое преобразование интенсивности [2, с.1–11]

$$y_i = \log x_i = \log x'_i \times + \log \alpha_i = y'_i \times + \beta_i, \quad (2)$$

где x_i обозначает интенсивность в вокселе i ($i = 1, \dots, n$). Чтобы избежать числовых ошибок, необходимо обратить внимание на воксели или пиксели с низкими значениями интенсивности, которые обычно исключаются из расчетов [2, с.1–11].

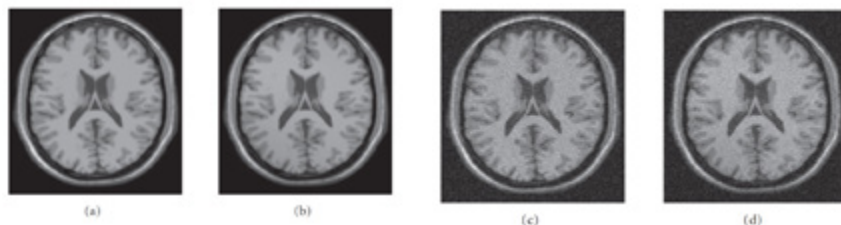


Рисунок 2. Изображения, полученные при помощи BrainWeb: (a) исходное изображение, (b) изображение с 40 %-ной неоднородностью, (c) изображение с 9 %-ным шумом и (d) изображение с обоими артефактами [2, с.1–11].

Материалы и методы

Неоднородность интенсивности может значительно ухудшить точность сегментации и регистрации изображений, что в свою очередь снижает достоверность последующих количественных измерений. Для решения этой проблемы разработан ряд методов. Если карта неоднородности интенсивности на изображении (например, рисунок 1(c)) известна или ее можно оценить, то исправление этой неоднородности можно выполнить с помощью деления (1) или вычитания в логарифмической области (2).

Чаще всего карта неоднородности интенсивности получается ретроспективно только на основе данных изображения. В этом направлении было предпринято множество исследований и предложено множество

методов. Популярные математические модели описания неоднородностей интенсивности можно классифицировать следующим образом:

1) низкочастотная модель, которая предполагает, что неоднородность интенсивности представляет собой низкочастотные компоненты в частотной области, а карта неоднородности интенсивности может быть восстановлена с помощью фильтрации нижних частот;

2) модель гиперповерхности, аппроксимирующая карту неоднородности интенсивности гладким функционалом, параметры которого обычно получают с помощью регрессии;

3) статистическая модель, которая предполагает, что неоднородность интенсивности является случайной величиной или случайным процессом, а карта неоднородности интенсивности может быть получена путем статистической оценки;

4) другие модели, в основе которых лежат другие принципы, в некоторых случаях, не предполагающих наличия поля неоднородности интенсивности.

Таким образом, методы коррекции неоднородности интенсивности можно разделить на фильтрацию нижних частот, статистическое моделирование, аппроксимацию поверхности и другие.

В более ранних обзорах по данному направлению [3, с.1655-1666] сообщается об оценке эффекта коррекции неоднородности интенсивности при сегментации опухоли головного мозга. В данной статье предпринята попытка обобщить имеющуюся информацию, и основное внимание будет уделено математическому моделированию устранения неоднородности интенсивности. Тем не менее, это ни в коем случае не исчерпывающее изложение.

Поскольку неоднородность интенсивности медленно меняется в области изображения, ее спектр в частотной области будет сосредоточен в низкочастотной области. Таким образом, для того, чтобы отделить истинное изображение от неоднородности интенсивности, необходимо применить фильтр нижних частот L . После применения низкочастотного фильтра в логарифмической области можно получить приблизительно следующее [2, с.1-11]:

$$L\{y\} \approx \beta. \quad (3)$$

Данная процедура коррекции неоднородности яркости схожа с фильтрацией, применяемой для цифровой обработки изображений с целью коррекции неоднородности освещенности [2;4]. По сути, выражение (1) напоминает модель освещения и отражения в оптических изображениях [2;4], в которой артефакт неоднородности освещения часто называют «затенением» [2, с.1-11]. Следовательно, методы, используемые для коррекции затенения,

такие как гомоморфная фильтрация, могут быть адаптированы для устранения неоднородности интенсивности, и наоборот. Исследование применения методов коррекции неоднородности интенсивности для решения проблемы затенения на микроскопических изображениях было проведено в [5, с.212–223].

Благодаря простоте и эффективности реализации методы фильтрации нижних частот получили широкое распространение [4;5;6]. В работе [7, с.161-171] было проведено исследование влияния ширины фильтра на коррекцию неоднородности интенсивности. В ходе исследования было установлено, что данные методы необходимо применять с осторожностью, чтобы не возникло искажений интенсивности и искусственных артефактов в изображениях, которые были скорректированы.

Недавно методы фильтрации нижних частот были расширены с использованием вейвлет-преобразования [8;9] и показали свою эффективность в устранении неоднородности интенсивности в изображениях, полученных с помощью поверхностных катушек и катушек с фазовой решеткой.

В исследовании [10, с.133-144] было представлено усовершенствование метода фильтрации нижних частот [6, с.204-211]. Данный метод корректирует размер ядра фильтра, для минимизации ошибки сегментации. В общем, идея схожа с подходами, описанными в [8;9] касательно коррекции неоднородности интенсивности с использованием масштабного пространства, однако, отличается по критерию выбора оптимального масштаба.

Результаты и обсуждение

Многие методы коррекции неоднородности интенсивности тесно связывают эту задачу с сегментацией изображения, решая обе эти проблемы поочередно с помощью итерационного процесса. Очевидным является тот факт, что точная сегментация значительно упростила бы процесс коррекции неоднородности интенсивности. В то же время, можно утверждать, что если неоднородность интенсивности устранена наиболее точно, то и качество сегментации также улучшится. Поэтому неудивительно, что существует множество подходов, которые решают обе задачи в единой структуре.

У многих пользователей, в свою очередь возникают вопросы, касающиеся эффективности метода и как можно его оценить, и при этом, какой метод предпочтительно применить для использования в практических системах обработки медицинских изображений, или существует ли метод, значительно превосходящий все остальные. Для того чтобы дать ответы на все эти вопросы нужно провести масштабные сравнения на различных наборах данных. В связи с тем, что истинное значение неоднородности поля смещения реальных данных неизвестна, это представляет большую сложность. Одной из распространенных проблем при оценке алгоритмов

компьютерного зрения является недостаток точной информации. Для решения данной проблемы существуют два возможных пути решения. Стремиться к «золотому стандарту», опираясь на экспертные оценки, – один из них, и может оказаться трудоемким процессом.

В отличие от большого количества методов коррекции неоднородности интенсивности, сравнительных исследований существующих алгоритмов было проведено довольно мало. Sled и соавт. [11, с.459–464] выполнили сравнение трех методов коррекции: максимизации ожидания (ЕМ), белого вещества (WM) и метода N3, используя смоделированные данные, взвешенные по T1, T2 и PD [2, с.1-11].

Было установлено, что по сравнению с другими методами для объемов, взвешенных по T1, метод WM показывает лучшие результаты. Вероятно, это связано с высоким контрастом между белым веществом (WM) и другими тканями на таких изображениях [2, с.1–11]. Метод ЕМ внёс слишком большие коррективы для вокселей, не соответствующих модели классификации тканей, что согласуется с выводами, представленными в [12, с.429–442]. В целом, метод N3 демонстрировал наибольшую стабильность для всех исследованных смоделированных изображений.

В исследовании [3, с.212–223] Velthuizen и соавторы провели оценку четырех методов коррекции неоднородности интенсивности при сегментации опухолей головного мозга. Эти методы включали фантомный метод, два метода низкочастотной фильтрации и метод подгонки поверхности с опорными точками, выбранными из белого вещества. Результаты показали, что метод подгонки поверхности уступает остальным, что, вероятно, связано с особенностями выбора опорных точек. Как уже упоминалось, этот аспект критичен для эффективности метода подгонки поверхности. В работе [13, с.760–771] был представлен автоматизированный метод создания таких опорных точек. Кроме того, Z. Nou и S. Huang [14, с.1–10] разработали схожий метод, основанный на статистике порядка, который демонстрирует результаты, сопоставимые с современными методами коррекции неоднородности интенсивности.

Более глубокое исследование было проведено в [15, с.931-943]. В ходе данного исследования сравнивались шесть алгоритмов, которые включают в себя n3, hum, eq, bfc, spm (статистическое параметрическое отображение) и ста5. Данные алгоритмы сравнивались с данными, которые были получены с помощью BrainWeb, а также и с реальными объемами, включая повторные сканирования одного и того же объекта, сканирования в разных магнитных полях и с использованием различных сканеров. В основе методов hum, eq и ста лежит фильтрация низких частот [2,с.1–11]. Метод spm использует аппроксимацию поверхности, при этом его параметры

определяются интеграцией с моделью смеси тканей. Было обнаружено, что карты неоднородности интенсивности, полученные методами фильтрации, могут демонстрировать более высокочастотные структуры, относящиеся к анатомии мозга.

Метод *srm* может быть нестабильным при работе с относительно однородными объемами изображений и может привести к ложному решению для некоторого объема. В целом методы *n3* и *bfc* превосходят остальные четыре метода. При низких уровнях смещения метод *bfc* показывает более точные результаты по сравнению с *n3*, тогда как при высоких уровнях смещения ситуация меняется, и *n3* становится более эффективным. Но, несмотря на это, ни один из шести методов не демонстрирует идеальных результатов во всех рассмотренных условиях.

Wells и соавт. [12, с. 429-442] описали метод, проблема которого аналогична проблеме метода *srm*. В обоих методах применяется смешанный гауссов классификатор, точность которого может быть недостаточной для точного моделирования распределения интенсивности изображений, наблюдаемых на практике. В свою очередь, три метода, основанные на фильтрации, не имеют механизма адаптации мощности фильтрации к качеству данных, что позволяет объяснить их меньшую эффективность по сравнению с методами *n3* и *bfc*.

Несмотря на то, что требуется больше сравнительных исследований с использованием более широкого спектра МР-изображений, конечным пользователям не следует ожидать, что один алгоритм будет непревзойденным и универсально применимым. В целом, у каждого из методов есть основные предположения и ограничения, и также выбор подходящего метода зависит от конкретной задачи, источника данных и их качества. Хотя сложные методы могут обеспечивать более точную коррекцию неоднородности интенсивности, важно учитывать также вычислительные затраты и итоговую ошибку сегментации. Метод *n3* широко используется в общедоступных программах и зарекомендовал себя как эффективный, тогда как метод *bfc* может быть особенно полезен, когда изображения подвержены значительному шуму [14, с.1-10].

Информация о финансировании (при наличии)

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования научных и (или) научно-технических проектов на 2024–2026 годы Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №АР23486396 «Модели и методы распознавания анатомических структур на изображениях МРТ в задачах компьютерной диагностики»).

Выводы

В результате проведенного исследования были обобщены современные подходы к коррекции неоднородности интенсивности на МР-изображениях. Было установлено, что методы фильтрации, несмотря на их простоту и распространенность, могут быть менее эффективными по сравнению с более сложными моделями, такими как подгонка поверхности и статистические методы, особенно в контексте интеграции с задачами сегментации и регистрации изображений. Полученные результаты подчеркивают необходимость выбора метода коррекции, исходя из специфики решаемой задачи и характеристик исходных данных.

В данной статье представлен краткий обзор последних достижений в области коррекции неоднородности интенсивности МР-изображений. Наиболее популярными моделями для описания поля неоднородностей интенсивности являются низкочастотная, гиперповерхностная и статистическая модель.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Styner, M., Brechbuhler, C., Szekely, G., Gerig, G.** Parametric estimate of intensity inhomogeneities applied to MRI, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 19, no. 3, 2009. – pp.153–165.

2 **Zujun Hou.** A Review onMR Image Intensity Inhomogeneity Correction. Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Biomedical Imaging, Volume 2006, Article ID 49515, Pages 1–11, DOI 10.1155/IJBI/2006/49515.

3 **Velthuizen, R. P., Cantor, A. B., Lin, H. , Fletcher, L. M., Clarke, L. P.** Review and evaluation ofMRI nonuniformity corrections for brain tumor response measurements, Medical Physics, ol. 25, No. 9, 2008. – P 1655–1666.

4 **Gonzalez, R. C., Woods, R. E.** Digital Image Processing, Pearson, NY, 2018.

5 **Tomazevic, D., Likar, B., Pernus, F.** Comparative evaluation of retrospective shading correction methods, Journal of Microscopy, vol. 208, No. 3, 2002. – P. 212–223.

6 **Cohen, M. S., Dubois, R. M., Zeineh, M. M.** Rapid and effective correction of RF inhomogeneity for high fieldmagnetic resonance imaging, Human BrainMapping, vol. 10, No. 4, 2009. – P. 204–211.

7 **Brinkmann, B. H., Manduca, A., Robb, R. A.** Optimized homomorphic unsharp masking for MR grayscale inhomogeneity correction, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 17, No. 2, 2018. – P. 161–171.

8 **Han, C., Hatsukami, T. S., Yuan, C.** A multi-scale method for automatic correction of intensity non-uniformity in MR images, *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 13, No. 3, 2010. – P. 428–436.

9 **Lin, F., Chen, Y., Belliveau, J. W., Wald, L. L.** A waveletbased approximation of surface coil sensitivity profiles for correction of image intensity inhomogeneity and parallel imaging reconstruction, *Human BrainMapping*, vol. 19, No. 2, 2003. – P. 96–111.

10 **Gispert, J. D., Reig, S., Pascau, J., Vaquero, J. J., Garcia-Barreno, P., Desco, M.** Method for bias field correction of brain T1-weighted magnetic resonance images minimizing segmentation error, *Human BrainMapping*, vol. 22, No. 2, 2014. – P. 133–144.

11 **Sled, J. G., Zijdenbos, A. P., Evans, A. C.** A comparison of retrospective intensity non-uniformity correction methods for MRI, in *Proceedings of the 15th International Conference in Information Processing in Medical Imaging*, Vol. 1230 of *Lecture Notes in Computer Science*, Poultney, Vt, USA, 2017. – P. 459–464.

12 **Wells, W. M., Grimson, W. E. L., Kikinis, R., Jolesz, F. A.** Adaptive segmentation of MRI data, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. 15, No. 4, 2016. – P. 429–442.

13 **Wang, D., Rose, S. E., Chalk, J. B., Doddrell, D. M., Semple, J.** Improved version of white matter method for correction of non-uniform intensity in MR images: application to the quantification of rates of brain atrophy in Alzheimer's disease and normal aging, in *Proceedings of Medical Imaging 2000: Image Processing*, Vol. 3979 of *Proceedings of SPIE*, San Diego, Calif, USA, 2009. – P. 760–771.

14 **Hou, Z., Huang, S.** Preliminary segmentation based on order statistics for intensity inhomogeneity correction in brain MR images, *Technique Report*, Singapore Bioimaging Consortium, Singapore, 2008.

15 **Arnold, J. B., Liow, J., Schaper, K. A. et al.** Qualitative and quantitative evaluation of six algorithms for correcting intensity nonuniformity effects, *NeuroImage*, Vol. 13, No. 5, 2011. – P. 931–943.

Поступило в редакцию 19.09.24

Поступило с исправлениями 17.10.24

Принято в печать 04.12.24

А. К. Танкибаева¹, И. Г. Казанцев², С. К. Кумаргажанова³,

А. С. Тлебалдинова⁴, Ж. К. Азаматова⁵

^{1,3,4,5}Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университет,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

²Есептік математика және математикалық геофизика институты,

Ресей ғылым академиясының Сібір бөлімшесі,

Ресей Федерациясы, Новосибирск қ.

19.09.24 ж. баспаға түсті.

17.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

04.12.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

МАГНИТТІК-РЕЗОНАНСТЫҚ БЕЙНЕЛЕРДІҢ ҚАРҚЫНДЫЛЫҒЫНЫҢ БІРКЕЛКІ ЕМЕСТІГІН ТҮЗЕТУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ

Мақалада магниттік-резонанстық бейнелеу процесінде пайда болатын қарқындылықтың гетерогенділігін түзетудің заманауи әдістері қарастырылады. Әр түрлі факторлардан туындаған қарқындылықтың гетерогенділігі МР-кескіндерін автоматты түрде талдауды едәуір қиындатады. Жұмыста берілген артефактіні түзету үшін қолданылатын ең танымал математикалық модельдер ұсынылған, атап айтқанда, төмен жиілікті модель, гипербет моделі және статистикалық модель. Бұл әдістердің тиімділігі мен есептеу күрделілігін ескере отырып, салыстырмалы талдау жүргізілді. Алынған нәтижелер МР-кескіндеріне негізделген компьютерлік диагностиканың дәлірек және сенімді әдістерін әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Клиникалық диагностика үшін магнитті-резонанстық томографияның жиі қолданылуына байланысты, компьютерлік көру және үлгіні тану әдістерін қолдану арқылы алынған кескіндерді автоматты талдауға көп көңіл бөлінеді. Мұндай компьютерлік диагностикалық құралдарды жасауда жиі кездесетін мәселе МР кескіндеріндегі қарқындылықтың біркелкі еместігін түзету болып табылады.

Интенсивтіліктің біртектілігінің бұзылуы статикалық магнит өрісінің біркелкі болмауы, градиенттік өріс тудыратын құйынды токтар және қабылдаушы катушканың сезімталдығының біркелкі еместігі сияқты факторлардың әсерінен пайда болады. Бұл құбылыс көбінесе МР-кескінінің артефакті немесе ауытқы өрісі деп аталады. Ауытқы өрісі – төмен жиілікті, тегіс сигнал ол МР-кескіндерге теріс әсер етеді және бейнелерді өңдеуге, сондай-ақ кейінгі компьютерлік

диагностикаға кедергі келтіретін маңызды фактор болып табылады. МР-кескіндердегі ауытқы өрістерін түзету үшін алдын ала өңдеу кезеңі қажет, бұл кезеңде суреттегі интенсивтіліктің біртексіздігі түзетіледі.

Кілттік сөздер: магнитті-резонансты бейнелеу, қарқындылықтың гетерогенділігі, сегментация, ауытқы өрісі.

*A. K. Tankibayeva¹, I. G. Kazantsev², S. K. Kumargazhanova³,

A. S. Tlebaldinova⁴, Zh. K. Azamatova⁵

^{1,3,4,5}D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,

Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

Russian Federation, Novosibirsk

Received 19.09.24

Received in revised form 17.10.24

Accepted for publication 04.12.24

REVIEW OF METHODS FOR CORRECTING INHOMOGENEITY IN MAGNET RESONANCE IMAGING INTENSITY

The article discusses current methods for correcting intensity inhomogeneity occurring during magnetic resonance imaging. Intensity inhomogeneity, caused by various factors, significantly complicates the automatic analysis of MRI images. The paper presents the most popular mathematical models used for correcting the artifact, such as the low-frequency model, the hypersurface model, and the statistical model. A comparative analysis of these methods has been conducted, taking into account their effectiveness and computational complexity. The obtained results can be used to develop more accurate and reliable methods for computer-aided diagnosis based on MRI images.

Due to the frequent use of magnetic resonance imaging for clinical diagnosis, considerable attention is paid to the automatic analysis of the acquired images using computer vision and pattern recognition methods. In the development of such computer-aided diagnostic tools, a frequent problem is the correction of intensity heterogeneity (IH) in MR images.

Intensity inhomogeneity arises from factors such as uneven static magnetic fields, eddy currents induced by gradient fields, and non-uniform sensitivity of the receiving coil. This phenomenon is often referred to as an

MRI artifact, also known as a bias field. A bias field is a low-frequency, smooth signal that negatively impacts MRI images and poses a significant obstacle to image processing and subsequent computer-aided diagnosis. To correct bias fields in MRI images, a preprocessing step is required, during which the intensity inhomogeneity is adjusted.

Keywords: magnetic resonance imaging, intensity inhomogeneity, segmentation, bias field.

<https://doi.org/10.48081/RLNT9009>***Г. Ж. Тасболат¹, А. Ш. Алимгазин², А. Н. Бергузинов³**^{1,2}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана³Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3790-2097>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5848-1842>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>*e-mail: galymzhan_zh@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ: ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ И ВИЭ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В условиях глобальных изменений климата и растущих требований к энергоэффективности, технологии тепловых насосов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) становятся ключевыми компонентами систем автономного теплоснабжения. Автономное теплоснабжение представляет собой систему, способную обеспечить тепло и горячую воду в зданиях или на территории без зависимости от центральных источников теплоснабжения. Основные принципы автономного теплоснабжения основаны на интеграции различных технологий для эффективного производства, распределения и хранения тепловой энергии. Тепловые насосы (ТН) и возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнечные коллекторы и ветрогенераторы, представляют собой перспективные технологии для автономного отопления. Эти технологии позволяют значительно сократить потребление ископаемого топлива, уменьшить углеродный след и обеспечить стабильное и эффективное теплоснабжение. Тем не менее, их внедрение требует комплексного подхода к проектированию и интеграции, что делает необходимым детальное изучение и моделирование этих систем. В данной статье представлены результаты исследования применения тепловых насосов и ВИЭ в автономных системах отопления с использованием методов компьютерного моделирования. Оценены различные сценарии

интеграции, проведен анализ их эффективности и предложены рекомендации для оптимизации таких систем.

Ключевые слова: Тепловые насосы, возобновляемые источники энергии, компьютерное моделирование, автономное теплоснабжение, энергоэффективность.

Введение

В условиях глобального изменения климата и нарастающих проблем с устойчивостью энергоснабжения, вопрос повышения энергоэффективности и переход на экологически чистые источники энергии становятся крайне актуальными. Системы автономного теплоснабжения, использующие традиционные источники энергии, часто сталкиваются с проблемами высокой энергетической зависимости и значительными углеродными выбросами. В связи с этим возникает необходимость поиска и внедрения инновационных решений, способных снизить негативное воздействие на окружающую среду и повысить энергоэффективность [1, с.76–83].

Компьютерное моделирование представляет собой мощный инструмент для анализа и оптимизации систем отопления. Оно позволяет учитывать множество факторов, таких как климатические условия, сезонные колебания температуры, потребление энергии и производственные возможности ВИЭ. С помощью моделирования можно выявить оптимальные сценарии для интеграции различных компонентов системы, предсказать их поведение в реальных условиях и оценить эффективность предлагаемых решений [2, с.101–112].

Актуальность данного исследования определяется несколькими ключевыми факторами:

- Рост интереса к энергоэффективным технологиям: В условиях глобальных климатических изменений и перехода на устойчивое развитие, необходимость в энергоэффективных системах отопления становится все более очевидной.

- Необходимость оптимизации систем автономного теплоснабжения: Учитывая возросшие требования к снижению выбросов и увеличению энергоэффективности, необходимо проводить детальное моделирование и оптимизацию систем, чтобы гарантировать их максимальную эффективность и экономическую целесообразность.

- Развитие технологий и доступность данных: Современные программные средства и вычислительные мощности позволяют проводить сложные модели и симуляции, что открывает новые возможности для исследования и разработки инновационных решений в области отопления.

- Проблемы в реальных условиях эксплуатации: Практическое внедрение технологий ТН и ВИЭ часто сталкивается с проблемами, которые можно эффективно решить с помощью предварительного моделирования и анализа.

Таким образом, исследование применения тепловых насосов и ВИЭ в системах автономного теплоснабжения с использованием компьютерного моделирования имеет высокую практическую и научную значимость. Оно позволяет разработать обоснованные рекомендации по оптимизации таких систем, что способствует их более широкому внедрению и улучшению энергоэффективности в различных климатических зонах и условиях эксплуатации [3, с.10-12].

Целью данного исследования является разработка и оптимизация моделей автономных систем теплоснабжения с использованием тепловых насосов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ), основанных на компьютерном моделировании. Исследование направлено на повышение энергоэффективности и устойчивости таких систем, а также на минимизацию их экологического воздействия.

Создание пилотного энергоэффективного дома с минимальными выбросами парниковых газов использованием различных возобновляемых источников энергии (теплота грунтовых вод, солнечная энергия и т.д.) при модернизации системы энергообеспечения здания Учебно-оздоровительного центра (УОЦ) «Тумар» площадью 1330 м².

Для проведения компьютерного моделирования выбраны следующие программные инструменты:

EnergyPlus: Программное обеспечение для энергетического моделирования зданий, позволяющее учитывать теплопередачу, отопление и охлаждение.

TRNSYS: Система для динамического моделирования и анализа тепловых систем, которая поддерживает интеграцию с солнечными коллекторными системами и тепловыми насосами.

MATLAB/Simulink: Для проведения дополнительных расчетов и анализа данных, а также для разработки алгоритмов управления.

Пакет проектирования пассивного дома (PHPP): Пакет проектирования пассивного дома (PHPP, Passive House Planning Package) – это специализированное программное обеспечение, разработанное для проектирования зданий по стандартам пассивного дома. Оно помогает архитекторам, инженерам и строителям оценивать энергоэффективность зданий и оптимизировать их характеристики [4, с.45-62].

Объект исследования: Модель автономной системы отопления учебно-оздоровительного центра (УОЦ) «Тумар» площадью 1330 м².

Материалы и методы

Компьютерное моделирование энергоэффективных решений в области автономного теплоснабжения с использованием тепловых насосов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) позволяет оптимизировать проектирование и эксплуатацию систем. В данном разделе рассматриваются используемые материалы и методы.

Тепловые насосы: Используются тепловые насосы различного типа- «вода-вода», «воздух-вода», «грунт-вода». Для моделирования выбираются конкретные модели, подходящие для климатических условий региона.

ВИЭ: Рассматриваются солнечные панели (фотоэлектрические и солнечные коллекторы) и ветряные турбины. Для каждого источника выбираются характеристики, включая мощность и коэффициент полезного действия.

Программное обеспечение для моделирования:

EnergyPlus: Моделирование энергопотребления зданий и систем отопления.

MATLAB/Simulink: Моделирование динамических процессов и управления системами.

TRNSYS: Моделирование систем теплоснабжения с учетом ВИЭ.

Пакет проектирования пассивного дома (PHPP): Пакет проектирования пассивного дома (PHPP, Passive House Planning Package)

Данные для моделирования:

Климатические данные (температура, скорость ветра, солнечная радиация) получаются из метеорологических станций и климатических баз данных.

Данные о потреблении энергии (тепловые нагрузки зданий) собираются на основе ранее проведенных расчетов или исследований.

Метод компьютерного моделирования:

Создание трехмерных моделей зданий и систем отопления в программном обеспечении.

Настройка параметров тепловых насосов и ВИЭ с учетом местных условий.

Симуляция работы системы: Запуск модели для оценки работы системы в различных климатических условиях и режимах нагрузки.

Проведение сценарного анализа для выявления оптимальных сочетаний тепловых насосов и ВИЭ.

Использование алгоритмов оптимизации (например, генетические алгоритмы или метод градиентного спуска) для нахождения наилучших параметров системы, включая мощность насосов, размеры солнечных панелей и ветряных турбин.

Сравнение различных конфигураций системы по параметрам: экономичность, эффективность, углеродный след.

Использование графиков и таблиц для визуализации данных о производительности систем.

Сравнение с экспериментальными данными: Полученные результаты сравниваются с данными, полученными из реальных систем для проверки точности модели.

Чувствительный анализ: Оценка влияния изменений ключевых параметров (например, температуры окружающей среды, цен на энергоресурсы) на производительность системы.

Использование тепловых насосов и ВИЭ в компьютерном моделировании автономного теплоснабжения позволяет находить оптимальные решения для повышения энергоэффективности. Применяемые материалы и методы обеспечивают высокую точность и надежность получаемых результатов.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная часть работы демонстрирует, что использование тепловых насосов в сочетании с возобновляемыми источниками энергии, такими как солнечные коллекторы и ветрогенераторы, может значительно повысить эффективность автономного теплоснабжения. Интеграция ВИЭ позволяет сократить потребление традиционных источников энергии, улучшить экономические показатели и снизить воздействие на окружающую среду. На основе проведенного моделирования можно сделать выводы о лучших конфигурациях систем и предложить рекомендации по их оптимизации для достижения максимальной эффективности и устойчивости.

1 Энергетическая эффективность: Сравнение производительности систем: Результаты моделирования показали, что интеграция солнечных коллекторов и ветрогенераторов значительно увеличивает эффективность системы автономного теплоснабжения по сравнению с базовой конфигурацией, использующей только тепловые насосы. В частности, солнечные коллекторы увеличивают долю возобновляемой энергии, поступающей в систему, на 20-30%, в зависимости от солнечной радиации и площади коллекторов. Ветрогенераторы способствуют дополнительному увеличению эффективности на 10-15%, особенно в регионах с высоким уровнем ветров.

Изменение потребления энергии: Моделирование показало, что комбинация тепловых насосов и ВИЭ позволяет значительно снизить общее потребление энергии от традиционных источников. Это особенно заметно в зимние месяцы, когда тепловые насосы работают в режиме отопления, а солнечные коллекторы и ветрогенераторы могут компенсировать часть потребления.

Эффективность систем хранения: Включение аккумуляторов и термальных накопителей в модель помогает нивелировать колебания в производстве энергии от ВИЭ. Аккумуляторы обеспечивают стабильное энергоснабжение в периоды низкой активности солнечных коллекторов и ветрогенераторов, а термальные накопители помогают удерживать тепло для последующего использования.

2 Экономическая оценка: Капитальные затраты: Первоначальные инвестиции в систему, включающую тепловые насосы и ВИЭ, значительно выше, чем у традиционной системы отопления. Однако, затраты на установку солнечных коллекторов и ветрогенераторов могут быть компенсированы за счет снижения эксплуатационных затрат и экономии на потреблении энергии [5, с.205–214].

Эксплуатационные затраты: Операционные расходы, включая обслуживание и эксплуатацию, также снижаются благодаря использованию ВИЭ. Моделирование показало, что с учётом стоимости электроэнергии и стоимости обслуживания, интеграция ВИЭ может обеспечить возврат инвестиций в пределах 5-7 лет.

Возврат инвестиций: Анализ возврата инвестиций (ROI) показал, что, хотя начальные затраты высоки, система с ВИЭ позволяет получить экономическую выгоду в долгосрочной перспективе. Ожидаемый срок окупаемости системы составляет 5-8 лет, в зависимости от конкретных условий эксплуатации и тарифов на энергию.

3 Влияние на окружающую среду: Снижение выбросов : Интеграция ВИЭ в систему автономного теплоснабжения позволяет существенно сократить выбросы углерода в атмосферу. Моделирование показало, что использование солнечных и ветряных источников может снизить углеродный след системы на 40-60 % [6, с.9-12].

Стабильность и устойчивость: Системы с ВИЭ демонстрируют лучшую устойчивость к изменениям внешних условий и колебаниям цен на традиционные источники энергии. Это делает систему более надежной и устойчивой к изменениям на рынке энергетических ресурсов.

На основе проведенного моделирования и анализа результатов можно сделать следующие рекомендации:

1. Оптимизированная конфигурация: сочетание технологий: объединяйте солнечные коллекторы, ветровые турбины и тепловые насосы для достижения наилучших результатов. Рекомендуется использовать солнечные коллекторы в районах с сильным солнечным излучением, а ветровые турбины — в ветреных районах.

Интеграция накопителей: добавление аккумуляторов и тепловых накопителей в систему может повысить стабильность и надежность

электроснабжения, особенно в периоды снижения активности возобновляемых источников энергии.

2 Экономическая стратегия: планирование инвестиций: перед принятием решения о внедрении возобновляемых источников энергии рекомендуется провести подробный анализ затрат на установку и эксплуатацию. Финансовые планы должны учитывать не только первоначальные инвестиции, но и долгосрочные эксплуатационные расходы и экономию энергии.

Государственные субсидии и гранты: установка возобновляемых источников энергии с использованием государственных субсидий и грантов может значительно снизить первоначальные затраты и ускорить окупаемость инвестиций.

3 Энергоэффективность и устойчивость: мониторинг и контроль: постоянный мониторинг и эффективное управление производительностью системы помогают оптимизировать производительность системы и повысить общую эффективность. Дополнительная экономия энергии может быть достигнута с помощью интеллектуальных систем управления.

Гибкость: системы должны быть гибкими и способными адаптироваться к изменениям энергопотребления, климатических условий и цен на энергоносители.

Сравнение с экспериментальными данными: моделирование выполняется на основе предполагаемых данных и условий. Для проверки точности модели использовались имеющиеся экспериментальные данные о работе реальных систем отопления с тепловыми насосами и возобновляемыми источниками энергии. Результаты моделирования сравнивались с реальными проектными данными для оценки надежности и точности полученных результатов.

Анализ отклонений: оценка отклонения между смоделированными и экспериментальными данными. Выделяются различия в температуре, энергопотреблении и производительности оборудования. Найденные отклонения анализируются для понимания их причин и возможных путей улучшения модели.

Корректировка модели: на основе дисперсионного анализа модель корректируется для улучшения ее соответствия реальным условиям. Это включает в себя корректировку параметров модели и обновление данных о климатических условиях и характеристиках оборудования.

Интерпретация результатов

1. Сравнительный анализ конфигураций:

Настройте солнечные коллекторы. Использование солнечных коллекторов может значительно улучшить производительность вашей системы в солнечные дни, особенно весной и летом. Однако зимой, когда солнечное излучение ниже, эффективность может снизиться. Конфигурация

ветровых турбин: Ветровые турбины обеспечивают дополнительную выработку электроэнергии, особенно в районах с постоянными ветрами. Наиболее эффективные результаты достигаются при сочетании ветровых турбин и солнечных коллекторов.

Гибридная система: Сочетание солнечных коллекторов и ветровых турбин показывает наилучшие результаты с точки зрения энергоэффективности и снижения традиционного потребления энергии. Такая конфигурация позволяет использовать преимущества обеих технологий и минимизировать их недостатки.

2 Экономические причины:

Возврат инвестиций: Модели показывают, что системы, использующие комбинацию возобновляемых источников энергии, имеют более длительный срок окупаемости, чем системы, использующие только традиционные источники энергии. Однако экономические выгоды увеличиваются в течение срока службы системы.

Экономия эксплуатационных расходов: интеграция возобновляемых источников энергии может значительно снизить затраты на энергию. Моделирование подтвердило, что со временем экономия энергии превысила первоначальные затраты на установку и обслуживание.

3. Воздействие на окружающую среду:

Сокращение выбросов углекислого газа: интеграция возобновляемых источников энергии значительно снижает выбросы CO₂. На основании результатов моделирования было установлено, что использование возобновляемых источников энергии может снизить углеродный след системы на 50-70 % в зависимости от конфигурации и климатических условий [7; 8].

Перспективные направления для дальнейших исследований

1. Глубокое моделирование:

Расширение модели: Модель необходимо расширить, чтобы учесть другие факторы, такие как изменение климатических условий, сезонные изменения и влияние различных типов возобновляемых источников энергии. Рассмотрение более подробных данных может повысить точность моделирования и прогнозирования.

Моделирование других типов возобновляемой энергии: изучение возможности интеграции других возобновляемых источников энергии, таких как биомасса или геотермальная энергия, и их влияние на эффективность системы.

2 Инновационные технологии: разработка новых технологий: исследование и внедрение новых технологий хранения энергии, таких как усовершенствованные батареи и тепловые накопители, могут улучшить производительность системы и сократить расходы.

Интеллектуальные системы управления: разработка и тестирование интеллектуальных систем управления, которые могут оптимизировать производительность системы на основе реальных условий и прогнозов.

3 Экономическое и экологическое моделирование: долгосрочные экономические исследования: проведение дополнительных исследований для оценки долгосрочных экономических и социальных выгод возобновляемых систем отопления.

Оценка жизненного цикла: изучение полного жизненного цикла системы, включая производство, установку, эксплуатацию и утилизацию оборудования, для оценки общей нагрузки на окружающую среду и воздействия.

4 Полевые испытания и экспериментальные исследования:

Полевая валидация: проведение полевых испытаний для проверки точности модели и оценки фактической производительности системы в различных условиях.

Сбор данных. Сбор реальных данных от возобновляемых систем отопления, работающих в различных климатических условиях и условиях эксплуатации, для улучшения моделей и составления более точных прогнозов.

Результаты моделирования дают следующие ключевые выводы:

Эффективность тепловых насосов: Геотермальные тепловые насосы продемонстрировали наибольшую эффективность по сравнению с воздушными и водяными насосами, обеспечивая стабильную работу при различных климатических условиях и снижая потребление электроэнергии на 40-50 %.

Роль ВИЭ: Интеграция солнечных коллекторов и ветрогенераторов значительно уменьшает потребность в внешнем источнике энергии, позволяя покрывать до 60% потребностей системы в теплоснабжении при оптимальных условиях. Солнечные коллекторы оказываются более эффективными в регионах с высокой солнечной радиацией, тогда как ветрогенераторы – в ветреных областях.

Системы хранения: Наличие систем хранения энергии позволяет сглаживать колебания производства и потребления энергии, увеличивая общую эффективность системы. Наиболее эффективными оказались комбинации батарей с термальными аккумуляторами.

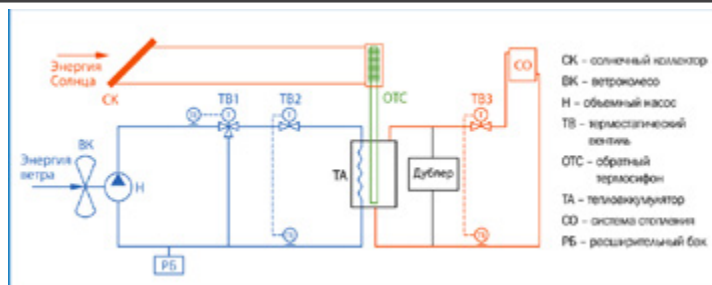


Рисунок 1– Схема интеграции теплового насоса и ВИЭ в систему автономного теплоснабжения

Экономическая оценка

Для оценки экономической целесообразности предложенных решений был проведен анализ затрат и выгод, включающий:

Капитальные затраты на установку ТН и ВИЭ

Операционные расходы, включая затраты на обслуживание и энергоресурсы

Потенциальную экономию на энергоносителях и снижение углеродных выбросов

Анализ показал, что начальные инвестиции в системы ТН и ВИЭ могут быть компенсированы в течение 5-7 лет за счет снижения эксплуатационных расходов и экономии на энергии. В долгосрочной перспективе такие системы не только оказывают положительное влияние на окружающую среду, но и становятся экономически выгодными [9, с.149-159].

Компьютерное моделирование подтвердило, что интеграция тепловых насосов и ВИЭ представляет собой эффективное решение для автономного теплоснабжения. Результаты исследования показывают, что такие системы могут значительно улучшить энергоэффективность и снизить экологическое воздействие, обеспечивая надежное и устойчивое теплоснабжение. Для достижения наилучших результатов необходимо учитывать местные климатические условия, особенности эксплуатации и правильно подбирать компоненты системы.

Будущие исследования могут быть направлены на расширение модели для учета более сложных условий эксплуатации, таких как изменение климата и адаптация систем к изменяющимся потребностям. Также важно изучить влияние новых технологий и материалов на эффективность и экономическую целесообразность интеграции ВИЭ и ТН [10].

Выводы. Разработка и оптимизация модели автономного теплоснабжения являются важными процессами для создания эффективных и устойчивых

Теруге 04.12.2024 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4317

Сдано в набор 04.12.2024 г. Подписано в печать 30.12.2024 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4317

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz