
Разработка системы преобразования энергии волн для питания морских буев с помощью пьезоэлектрических элементов

Ф.М. Аль-Руфай¹, Б.А. Якимович², В.В. Кувшинов²

¹Васитский университет, Ирак - Васит

²Севастопольский государственный университет, Севастополь

Аннотация: В данном исследовании рассматривается интеграция пьезоэлектрических элементов с морскими буюми для использования энергии волн в автономных морских устройствах. Система буюв была протестирована в контролируемых волнах и достигла пикового напряжения 5,6 В и максимальной мощности 40 мкВт. Результаты демонстрируют возможность использования системы для питания маломощных морских оборудование. Интеграция пьезоэлементов в системы морских буюв представляет собой экономически эффективное гибридное решение, что делает его перспективным источником энергии для питания буюв и датчиков в удаленных морских условиях.

Ключевые слова: преобразование энергии волн, морские волны, пьезоэлектрические элементы, высота волны, длина волны.

Растущий спрос на возобновляемые источники энергии стимулировал обширные исследования в области использования огромного энергетического потенциала океанов. Среди множества технологий использования морской энергии энергия волн выделяется своей высокой плотностью энергии, постоянством и глобальной доступностью [1,2]. Океанские волны, генерируемые ветром, взаимодействующим с поверхностью моря, обладают огромной кинетической и потенциальной энергией, которую можно эффективно преобразовать в полезную электроэнергию [3,4]. Перспективным методом использования энергии волн является интеграция пьезоэлектрических элементов в плавучие бую, что позволяет им преобразовывать механическое движение, вызванное волнами, в электрическую энергию. Пьезоэлектрические материалы получили широкое распространение в области сбора энергии благодаря своей способности генерировать электрические заряды под воздействием механического напряжения или деформации. Эти материалы проявляют прямой пьезоэлектрический эффект, что делает их идеальными для сбора

энергии от непрерывного и нерегулярного волнового движения. Будучи встроенными в океанские буи, пьезоэлектрические элементы могут эффективно использовать колебания, вызванные волнами, для производства электроэнергии, предлагая устойчивое и не требующее обслуживания решение для удаленных морских приложений [5-7]. Использование пьезоэлектрического преобразования энергии волн в буйках имеет множество преимуществ, включая минимальное воздействие на окружающую среду, масштабируемость и пригодность для питания морских устройств с низким энергопотреблением, таких как навигационные маяки, океанографические датчики и автономные системы мониторинга. Кроме того, пьезоэлектрические материалы отличаются высокой прочностью и устойчивостью к суровым морским условиям, что делает их пригодными для длительного использования в морских условиях [8].

Цель данной исследований разработка пьезоэлектрических элементов, которые могут быть интегрированы в буй. Пьезоэлектрический элемент вырабатывает энергию, когда подвергается вибрации от потока воды и волн. Полученная энергия преобразуется и накапливается в аккумуляторе, который впоследствии может использовать для питания датчиков..

Методы и материалы

Система состоит из двух основных компонентов: механической подсистемы, отвечающей за выработку энергии, и электрической подсистемы для преобразования и хранения энергии. Механические компоненты включают в себя пьезоэлементы, а электрические - выпрямитель, усилительные цепи, микроконтроллер с процессором и блок хранения данных [6].

На рисунке 1 показана схема пьезоэлектрической системы. Пьезоэлемент состоит из пьезоэлектрического полимера ПВДФ (поливинилидендифторид), который генерирует электрический заряд при

механической деформации. Это происходит потому, что ионы в материале смещаются в пределах проводящей поверхности в ответ на приложенную силу, что приводит к накоплению заряда, который может быть сохранен в перезаряжаемых батареях или конденсаторах. Полярность генерируемого заряда определяется направлением приложенного напряжения [4].



Рис. 1. – Принципиальная схема пьезоэлектрической системы

Пьезоэлемент был расположен внутри буя и имеет толщину 0,28 мм, длину 41 мм и ширину 16 мм, а электродом служит селвер, как показано на рис. 2.

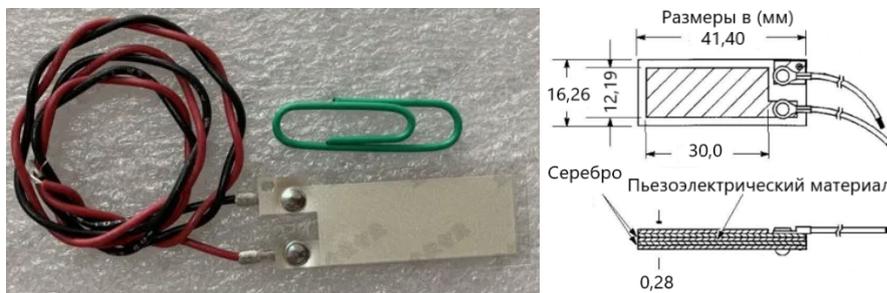


Рис. 2. – Пьезоэлектрический элемент (PVDF), используемый в исследовании

Экспериментальная установка в данном исследовании состоит из пьезоэлемента и сферического буя диаметром 30 см. В этой экспериментальной установке сферический буй, интегрированный с пьезоэлементом, подвергается волновому движению, непрерывно возбуждающему пьезоэлемент (рис. 3). Океанские волны обладают различными характеристиками, включая линейные, нелинейные и случайные. Для воспроизведения реальных волновых условий в контролируемой среде в

данном исследовании используется установка волнового канала. Волновой канал служит ценным инструментом для моделирования и оценки работы преобразователей энергии волн в различных условиях. Он разделен на две отдельные секции: область генерации волн и область испытаний.

Длина волны (L), представляющая собой расстояние между двумя последовательными гребнями и впадинами, определялась по следующей формуле [9,10]:

$$\omega^2 = gN_B \tanh(N_B D) \quad (1)$$

где: ω - угловая частота волны, g - гравитационное ускорение (9,81 м/с²), N_B - число волны, D - глубина воды.

$$\omega = 2\pi/T \quad (2)$$

где T - период волны (интервал между двумя последовательными гребнями или впадинами). Волновое число (N_B) определяется как:

$$N_B = 2\pi/L \quad (3)$$

Однако это уравнение является неявным и должно решаться численно или с помощью волновых таблиц. Глубоководное приближение длины волны (L_0) получается с помощью:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4)$$

После определения L_0 для дальнейшего анализа волн рассчитывается отношение глубины к длине волны (D/L_0).

Теоретическая мощность волны может быть рассчитана с помощью обычных гидродинамических соотношений. Поток энергии волны на единицу длины гребня волны может быть представлен как [9,10]:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T \quad (5)$$

где: ρ - плотность воды (1000 кг/м^3 в пресноводном водоеме), H - высота волны, T - период энергии волны, g - гравитационное ускорение ($9,81 \text{ м/с}^2$).

На рисунке 3 приведена принципиальная схема экспериментальной волнового канала. Для анализа влияния различных волновых условий были реализованы четыре различных сценария возбуждения путем изменения частоты волнового затвора в диапазоне от 5 до 20 Гц с регулярным интервалом в 5 Гц в течение 1 минуты для каждой выбранной частоты.



Рис. 3. – Принципиальная схема экспериментальной установки

Результаты и обсуждение

Для анализа возможностей пьезоэлектрической системы по выработке электроэнергии были реализованы четыре различных сценария воздействия волн, каждый с разной частотой затвора (5 Гц, 10 Гц, 15 Гц, 20 Гц). Эти вариации были созданы в волновом канале, чтобы исследовать выходное напряжение как высокого, так и низкого уровня при различных волновых условиях. Генерируемое напряжение непрерывно регистрируется с помощью регистратора данных на базе микроконтроллера, что позволяет проводить точные измерения и анализ в режиме реального времени.

Были проанализированы колебания высоты волны (см) относительно различных периодов волн, и на рисунке 4 представлено графическое представление этих изменений. Кроме того, оценивались зависимости между высотой волны, периодом волны и длиной волны в зависимости от частоты затвора. Рисунок 4 и таблица 1 показывают тенденцию, когда более высокие частоты волн соответствуют более коротким длинам волн, которые, в свою очередь, усиливают движение пьезоэлемента. Это приводит к увеличению

механического воздействия на пьезоэлемент, что впоследствии повышает эффективность генерации энергии.

Таблица 1

Влияние частоты затвора на характеристики волны и генерируемое напряжение

Частота (Гц)	H (см)	T (с)	L (м)	U (В)
5	6	2,43	3	3,1
10	9	1,95	2,8	4,3
15	13	1,82	2,71	4,8
20	17	1,57	2,59	5,6

На рисунке 5 представлено выходное напряжение пьезоэлектрической системы при различной частоте затвора, демонстрирующее, что уровень напряжения снижается по мере уменьшения частоты затвора.

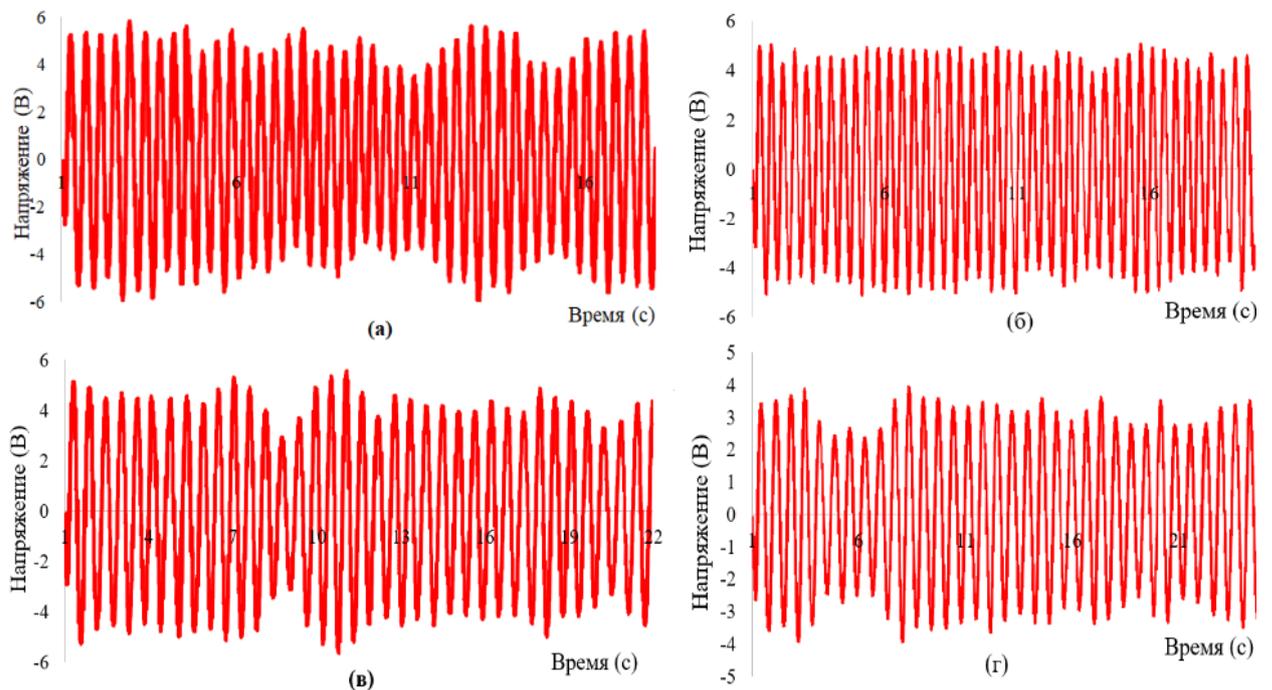


Рис. 4. – Выходное напряжение пьезоэлектрической системы при различных частотах (а) 20 Гц (б) 15 Гц (в) 10 Гц (г) 5 Гц

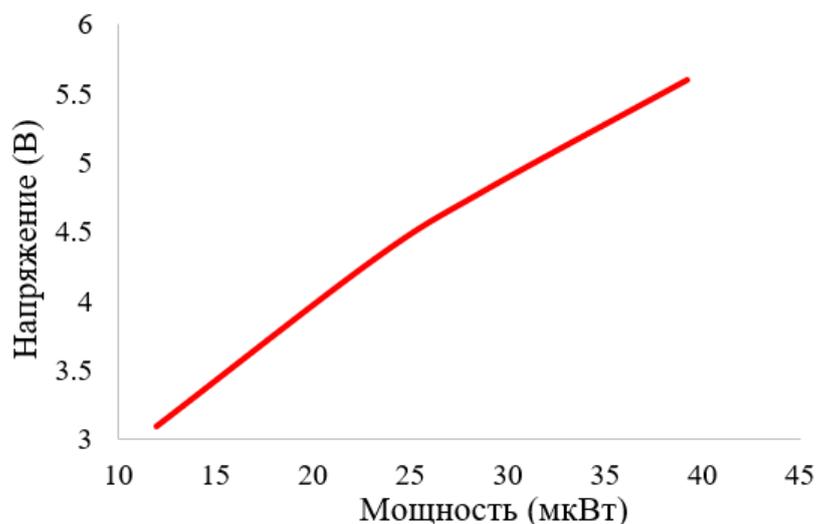


Рис. 5. – Отношение между генерируемой мощностью (мкВт) и выходным напряжением (В)

Как показано в таблице 1, самое высокое зарегистрированное напряжение составило 5,6 В при частоте 20 Гц, а самое низкое измеренное напряжение составило 3,1 В при частоте 5 Гц.

На рисунках 4 и 5 показаны напряжение и выходная мощность в зависимости от частоты затвора, что подчеркивает прямую пропорциональность между периодом волн и выработкой энергии, где увеличение периода волн приводит к увеличению выработки энергии.

Заключение

Исследование показало, что соединение пьезоэлемента с бумом значительно повышает выходную мощность пьезоэлектрической системы за счет вибрации и ускорения, вызванного волнами. Экспериментальные результаты показывают, что максимальная выходная мощность составила 40 мкВт при мощности волны 21,7 Вт, измеренной на частоте 20 Гц. Увеличение количества пьезоэлементов до 30 штук, а также использование высокоэффективных материалов может потенциально повысить выходное напряжение до 15 В. Исследование также показывает, что сбор энергии

малой мощности вполне осуществим и может быть усилен при более высоких частотах возбуждения. Интегрируя пьезоэлектрическую систему в океанские и морские буи, система предлагает экономически эффективный гибридный дизайн, что делает ее жизнеспособным энергетическим решением для питания датчиков в удаленных океанских и морских приложениях.

Литература

1. Antjnio F. de O.F. Wave energy utilization: a review of the technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2010, vol. 14 (3), pp. 899–9181.
2. Аль-Руфай Ф. М. М., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Основные положения методики оценки эффективности пьезопреобразователей // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2023, Т. 26, № 1, с. 28-34.
3. X. Xie, Q. Wang, N. Wu, Potential of a piezoelectric energy harvester from sea waves, *J. Sound Vib.*, 2014, vol. 333 (5), pp. 1421–1429.
4. H. Mutsuda, Y. Tanaka, R. Patel, Y. Doi, Y. Moriyama, Y. Umino, “A painting type of flexible piezoelectric device for ocean energy harvesting, *Appl. Ocean Res.*, 2017, vol. 68, pp. 182–193.
5. N. Viet, X. Xie, K. Liew, N. Banthia, Q. Wang, Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester, *Energy*, 2016, vol. 112, pp. 1219–1226.
6. Аль-Руфай Ф.М. Исследование технических характеристик пьезоэлемента с помощью программы Matlab // Инженерный вестник Дона, 2023, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8162
7. Z. Liu, Z. Han, H. Shi, and W. Yang, “Experimental study on multilevel overtopping wave energy convertor under regular wave conditions,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 2018, vol. 10, № 5, pp. 651–659.
8. Wang, X., et al. Multi-input SECE based on buck structure for piezoelectric energy harvesting. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 36, № 4, pp. 3638–3642.

9. M. R. Kiran, O. Farrok, M. Abdullah-Al-Mamun, M. R. Islam and W. Xu. Progress in Piezoelectric Material Based Oceanic Wave Energy Conversion Technology, in *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 146428-146449.

10. Rahman, A., Farrok, O., Islam, M. R., & Xu, W. (2020). Recent progress in electrical generators for oceanic wave energy conversion. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 2020, vol. 8, pp. 138595–138615.

References

1. Antjnio F. de O.F. Sustain. Energy Rev., 2010, vol. 14 (3), pp. 899–9181.

2. Al-Rufae F. M. M., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2023, vol 26, № 1, pp. 28-34.

3. X. Xie, Q. Wang, N. Wu, J. Sound Vib., 2014, vol. 333 (5), pp. 1421–1429.

4. H. Mutsuda, Y. Tanaka, R. Patel, Y. Doi, Y. Moriyama, Y. Umino, Appl. Ocean Res., 2017, vol. 68, pp. 182–193.

5. N. Viet, X. Xie, K. Liew, N. Banthia, Q. Wang, Energy, 2016, vol.112, pp.1219–1226.

6. Al-Rufae F.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8162.

7. Z. Liu, Z. Han, H. Shi, and W. Yang, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng., 2018, vol. 10, № 5, pp. 651–659.

8. Wang, X., et al., IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, vol 36, № 4, pp. 3638–3642.

9. M. R. Kiran, O. Farrok, M. Abdullah-Al-Mamun, M. R. Islam and W. Xu., in *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 146428-146449.

10. Rahman, A., Farrok, O., Islam, M. R., & Xu, W. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 2020, vol 8, pp.138595–138615.

Дата поступления: 14.02.2025

Дата публикации: 15.03.2025