

A Preliminary Study and Analysis of Tidal Stream Generators

Authors

Saad bin Abul Kashem
Molla E. Majid
Mujahid Tabassum
Azad Ashraf
Jarosław Guziński
Krzysztof Łuksza

Keywords

renewable Energy, tides, sustainable development, tidal stream, tidal lagoons, Dynamics, SolidWorks

Abstract

For a sustainable future, tidal energy can play a vital role. Tidal energy relies on the gravitational pull of the Moon and the Sun along with the centrifugal forces created by the Earth. Tidal barrage uses the potential energy from the tide and has been very successful in electricity production. With the help of a turbine, kinetic energy can also be harnessed from tidal currents to generate electricity. However, it is not economically feasible to use this type of technology for large scale production of electrical energy. It is important to note that the development of this technology is still in the early stage. This research paper provides a preliminary discussion of tidal energy generation using a few different technologies. Initial research has been done using Computational Fluid Dynamics and SolidWorks software on the tidal stream generator and tidal barrage system. Some of the key challenges are also identified in terms of the development of the tidal energy conversion system.

DOI: 10.12736/issn.2330-3022.2020101

Received: 3.10.2019

Revised: 13.11.2019

Accepted: 4.12.2019

Published online: 27.07.2020

1. Introduction

Tidal energy or tidal power is a renewable source of energy generated by the flow of ocean waters during the rise and fall of the tides. This rise and fall allows to convert the kinetic energy of water into usable power such as electricity. This mainly works by the water movements produced by the gravitational force between the Earth, the Moon and the Sun. This can be considered as a pure astronomical phenomenon that can be observed since the Earth rotates and possesses oceans. The basic principle of producing electrical energy involves a generator that converts this energy into electricity by seizing the kinetic energy from the sea current or tides [1–5].

Tidal energy does not cause emission of the greenhouse gases which are responsible for global warming or fog formation unlike the generation of electricity using fossil fuels. Therefore it is considered as a renewable source of electricity. Currently, three methods are available to produce tidal energy, such as: tidal

streams, tidal barrages, and tidal lagoons. In this paper, all of them are discussed and a basic comparison in terms of cost, efficiency and availability is made.

Wind turbines draw energy from air currents and tidal stream generators draw the energy the same way using water currents. However, the power generated using an individual tidal turbine can be greater than that of a wind energy turbine [2].

A tidal barrage works by using the height difference ΔH of the high and low tides and extracts the potential energy. Potential energy is seized from the tides by tactical placement of particular dams, which allow to produce electricity by using tidal barrage [3].

A newer version of the tidal energy harnessing design option is to build round spongy walls surrounded by turbines that can seize the potential energy from the high and low tides. These artificially created reservoirs can be considered similar to those of tidal barrages without having any natural ecosystem [1].

A form of low-head hydroelectricity is the tidal power which uses low-head hydroelectric generating equipment. Since the technology is well developed, the main barrier is the construction cost. At least a construction period of e.g. 10 years and an enormous capital cost is required for a tidal energy project [1].

However, the tidal stream generator is using renewable energy, the tidal energy. Even though tidal energy is renewable, it can also bring some adverse effects to the environment. No fuel is needed to operate the tidal stream generators. Thus, it can help save the fossil fuel, available naturally. Therefore, greenhouse gases, which can cause global warming, will not be produced. Besides that, after the tidal stream generators are built, their power will be free. Furthermore, with tidal stream generators, a large amount of electricity can be produced in countries with appropriate coast conditions.

Tidal stream generators can also produce power with greater efficiency. The tidal power can convert approximately 80% of kinetic energy into electricity, while the efficiency of energy generation by coal and oil is less than 50% [23]. Tidal stream generators not only provide the electrical energy, but also helps to preserve the environment. However, the construction cost may increase due to the device damage by the strong ocean storms and saltwater corrosion. Furthermore, shifting tides, resulting from the changes in tidal movement, could significantly decrease the effectiveness of tidal stream generators [24].

2. Tidal energy

As mentioned in the previous section, tidal movement can be used to generate electrical energy. The Earth, the Moon, and the Sun all generate the gravitational and centrifugal force creating the tide. The rise and fall of the surface of the ocean are generated by the gravitational force between the Sun and Moon, while the revolution of the Earth and the Moon creates the centrifugal force. The Moon has 2.2 times larger gravitational force than the Sun, as it is much closer to the Earth [4].

The tidal phenomenon happens twice every day, and lasts approximately 50 minutes, and 28 seconds. The gravitational pull of the Moon can cause the water to bulge towards it. This bulge of water is greater on the side of the Earth nearest the Moon. In the same way, the rotation of the Earth-Moon system, producing the centrifugal force, causes an another water bulge on the other side of the Earth, which is the furthest away from the Moon. When a landmass lines up with this Earth-Moon system, the water around the landmass is at the high tide, also known as spring tide, and when the landmass is at 90° to the Earth-Moon system, the water around it is at low tide, also known as a neap tide. Therefore, during one period of rotation, each landmass is exposed to two high tides and two low tides. Since the Moon rotates around the Earth, the timing of these tides at any point on the Earth will vary, occurring approximately 50 min later each day [4].

2.1. Tidal streams

A tidal stream generator is a machine that uses the undersea current to generate electricity. In the tidal generators, the kinetic energy of the water is used to power the turbines. A tidal stream generator utilizes the concept of a wind turbine. Since

the density of water is higher, the power generated by the tides can be greater than that of wind turbines [2]. These tidal stream generators are most often built by the sea, as the sea has a higher current flow, so as to generate the greatest amount of electrical energy. Tidal stream generators require ocean currents to turn the turbine, generating electricity. The forces acting upon the mean flow create the ocean current and direct the movement of seawater [5]. Breaking waves, the wind, the Coriolis Effect, cabling, temperature and salinity all affect the mean flow. The gravitational force of the Sun and the Moon creates the tides. The current's strength and direction can be influenced by: the depth contours, the interaction with other currents, and shoreline configuration. The bottom currents scour and sort the sediments, thus affecting the kind of bottom developing in the area, either soft or hard, fine-grained or coarse. Bottom material defines the organic environment that may develop in an area [6, 7].

Placing the turbines at sea is a complicated procedure, as the tidal generators are large and may disturb the tide that it is meant to exploit. Turbines of the tidal streams generator are arrayed underwater in rows, just like some wind farms. Furthermore, the most suitable current speed range for the tidal stream generators is between 3.6 and 4.9 knots (4 and 5.5 miles per hour (mph)) [8]. If a tide generates a flow speed between 4–5.5 mph, a tidal stream turbine can generate more power than a wind turbine. The ideal depth of water for location of tidal turbine farms is between 20 to 30 meters [8].

However, tidal stream generators are not that popular compared to wind turbines. Despite that, in December 2008, a tidal stream generator was built in Ireland, to generate about 12 MW [3].

Axial turbines

Axial turbines consist of a set of rotors. It has a fixed pitch blade of high efficiency. Tidal exchange is needed for the axial turbines to rotate [9, 10]. The AR-1000 is the first axial turbine which generates 1 MW power output with a 2.65 m/s rotation speed. This was developed by Atlantis Resources Corporation. Furthermore, in Marine Current Turbine in Strangford Lough located in Northern Ireland, a prototype SeaGen was installed in April 2008 [3]. SeaGen generates 1.2 MW power output. SeaGen consists of two axial flow rotors. The generator is propelled by one rotor. Since the rotor pitch can be adjusted within the range of 180 degrees, the turbines are able to effectively generate electrical energy [3]. In addition to that, a company called Tenax Energy of Australia has been granted permission to build 450 turbines around the Australian city of Darwin. The axial turbine of a 15 m rotor diameter with a gravity support is proposed. This type of turbine can operate in deep water, below the shipping channels. An estimated number of about 300 to 400 houses could be powered by each of such turbines [11, 12]. A UK-based company called Tidal stream has started building an axial turbine (Triton 3) in the Thames [3]. The full scale Triton 3 turbine has a power capacity of 3 MW while Triton 6 of 10 MW.

Vertical and horizontal axis crossflow turbines

This type of turbine can be installed vertically or horizontally. This design allows to generate electrical energy using any deep

water current, both river and tidal. This design has been used in South Korea to build a cross-flow turbine, generating 1 MW. Moreover, it is being expanded to generate 90 MW.

Flow augmented turbines

A duct and shroud (stator ring) are used to measure flow augmentation in flow augmented turbine. The shroud increases the power output of flow augmented turbines. An Australian company launched a rollout of the shrouded turbine. The company has calculated that two small flow augmented turbines would generate 3.5 MW [13].

2.2. Tidal barrage

The tidal barrage is part of renewable energy solution that consists of building tidal locks, dams, long wall, or sluice gate. It manages the potential energy of the ocean by capturing and storing it. The dam is constructed across the basin or tidal inlet, creating a single enclosed tidal reservoir. The lowest part of the barrage dam is placed at the seafloor and the tidal barrage is built at the highest level, so that the seawater can reach the highest peak of the annual tide. Seawater flows through an underwater tunnel built in the tidal barrage, using the sluice gates at the entrance and exit points. The tidal turbine generator is placed within this tunnel to harness the kinetic energy of the tidal waves by spinning thanks to the seawater flow. The basic principle of the tidal barrage is similar to hydroelectric generation, except that the water can flow in two directions in a tidal barrage, contrary to a hydroelectric plant, in which the water flows in one direction only. In the presence of high tides, the seawater can flow into the tidal reservoir and fill it up. During the outgoing ebbing tides, the water can flow in the opposite direction emptying the reservoir [14].

A tidal barrage is attractive due to a very long service life and a cost-effective electricity production. However, the capital cost of building a new barrage is very high and can have a big impact on wildlife.

The tidal barrage utilizes the nature of tide which rises and falls due to the gravitational pull between the Earth, the Sun and the Moon. These phenomena cause the seawater to move towards the Sun and Moon. This movement of seawater increases the sea level. However, on the open-ocean, the increase in the sea level is marginal due to the fact that the large surface area has a deeper depth for it to flow into. The rise in the sea level is significant only near the coastline. This is due to the upward sloping gradient of the sea bed. This funnel helps to direct the water into the lagoons, river inlets, and estuaries. A tidal barrage generation utilizes the tidal range, the vertical difference between the low and high tides of seawater level. The height difference between the high and low tide produces the potential energy of the tides. The difference in water level at either side of the dam is exploited for electricity generation. There are three types of tidal barrage operations: the Flood generation, the Ebb generation and finally the two-way generation [14–22].

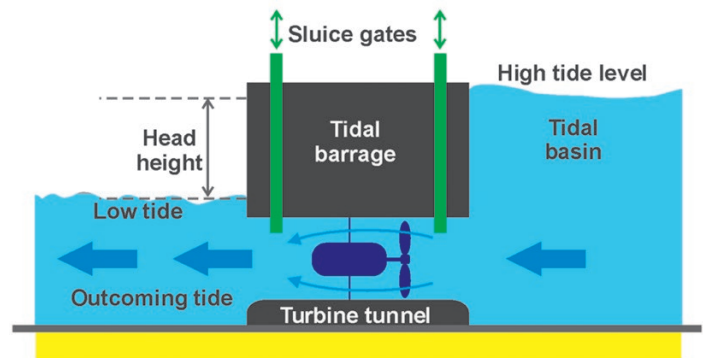


Fig. 1. Tidal barrage Ebb generation [3, 27]

Tidal barrage Ebb generation

Tidal barrage ebb generation uses falling tides, commonly referred to as the ebb tide to generate electricity. The sluice opens during low tide so that the tidal basin fills up at the rate determined by the upcoming tide. The sluices are closed as the water level within the basin reaches the threshold point at high tide. This traps the seawater within the reservoir. As the seawater level outside the basin drops during the outgoing tide, there emerges a difference between the higher level of water trapped in the basin and the actual ocean level, called the head height [15, 32–38].

The difference in the head height during the start of the ebb tide and the falling tide is sufficient to initiate the electrical energy generation. Sluice gates connected to the turbines within the tunnel are opened to allow water to flow [3, 39–46]. This allows to exploit the potential energy stored within the water. The turbines generate electricity until the head height difference gets low. After that, the turbines are disconnected and the sluice is closed. Figure 1 shows the tidal barrage Ebb generation [3, 27].

Flood generation

As the rising tides move closer towards the land, the high tide starts to enter the reservoir of the barrage. Once the high tide level reaches its peak, the sluice gates are closed completely. As the water level goes down outside the barrage, sluice gates are opened to release the stored water. While the water is flowing out through the tunnel, the turbine rotates and produces electrical energy [14, 23–25]. The flood tidal barrage is a one-way method of tidal energy generation. It is restricted to 6 hours per tidal cycle due to the fact that the reservoir has to fill up.

The turbines used are low-speed turbines, as the water flow through the tunnel to the tidal basin is a slow process. This slow filling cycle is not harmful for the ecosystem as sea life can enter the enclosed basin without being exposed to fast-rotating turbines. As the tidal basin is filled with water at high tide, the sluice gates are opened which allows all the stored water to return to the ocean.

This type of tidal energy production is less efficient, compared to ebb generation, because the total amount of kinetic energy within the lower half of the basin is smaller than the total kinetic energy present in the higher half of the basin due to the effect of gravity.

Two-way tidal barrage generation

Two-way tidal barrage utilizes the phenomena of both the rising and falling tide to generate electricity. It requires better utilization of the sluice gates for more accurate control. If the tide ebbs, the seawater flows in or out via the same gate system. The turbine rotates in both directions, according to the direction of the water flow [16].

The main drawback of this method is that it is less effective in generating electricity. Moreover, the design and automation of bi-directional energy production are more expensive and less efficient.

2.3. Tidal lagoons

Tidal lagoon refers to a man-made structure that is connected to the ocean by one or more inlets, closing off a tidal sea area and generating electricity from hydro turbines. Furthermore, tidal lagoons can have different water depths and such lagoons can be found on all continents. Hydro turbines are placed inside concrete turbine housings and permanently submerged [17].

When the breakwater rises, a difference in water level is generated. This is referred to as the “head” height. When the water level reaches the desired head height, sluice gates are opened and water flows into the lagoons [18]. The water inside the lagoon flows through turbines, generating electricity. Moreover, a tidal lagoon generates electrical energy twice, as the tide comes in and goes out. Furthermore, lagoons are expected to be active for an average of 14 hours a day [18].

The tide flow has a predictable pattern, therefore the energy generated from tidal lagoons is reliable. Hence, tidal lagoons do not need gas or coal power stations to be used as backup stations. This directly helps to reduce carbon dioxide emissions [18].

Since the lagoons can be built with natural materials, the environmental impact of tidal lagoons is low. They can be used as low breakwaters at low tide and can be submerged at high tide. This allows smaller fish to swim without any difficulty. Since lagoons are made from natural materials, they do not increase carbon dioxide emission. Moreover, tidal lagoons pose a much lower danger than nuclear power plants.

There are two design options for the lagoon wall. The first uses sandy material, which is used in many marine construction sites [19]. The second material is a quarry run, similar to coastal reinforcements and harbour walls. For both designs, large rocks will be positioned on top of the lagoon wall to protect it from degradation.

Unfortunately, the efficiency of a tidal lagoon is rather low. Furthermore, constructing a lagoon is expensive and many conditions have to be taken into consideration before their construction. For example, biodiversity, constructing area, etc. Because of that, currently there are no functioning power plants on tidal lagoons [25].

3. Simulation investigations

There is an ever increasing number of scientific publications analysing the tidal stream generators using various methods of modelling and simulation. In this paper, SolidWorks (2015) and Computational Fluid Dynamics (CFD) software have been used

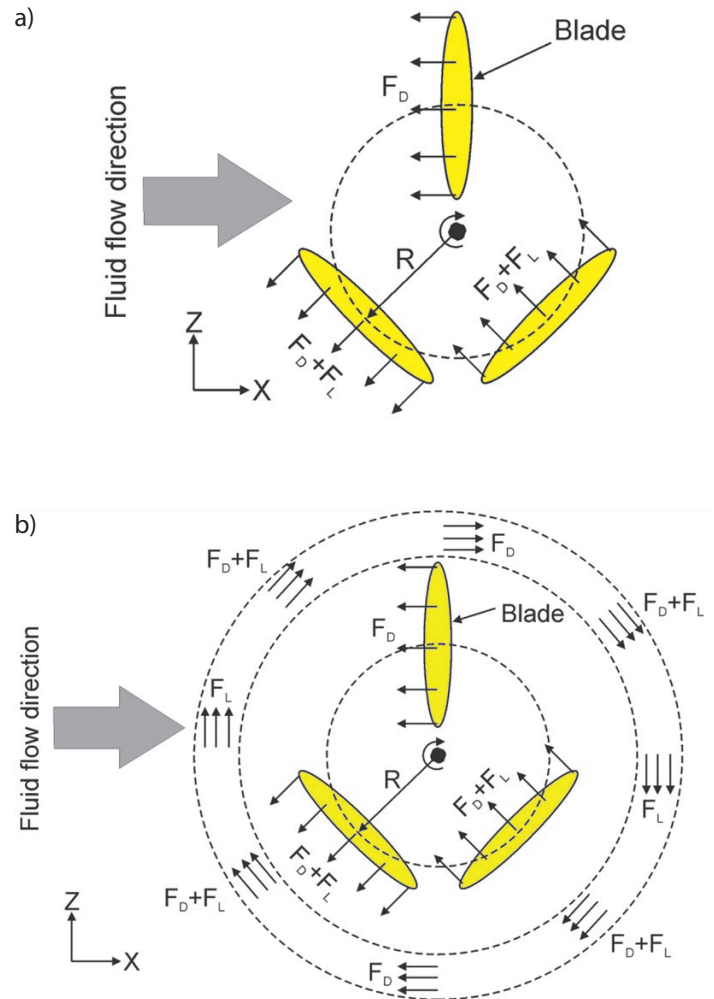


Fig. 2. (a) Force direction of the turbine blade; (b) Force direction with an additional force [20]

for simulation of a tidal stream generator and tidal barrage, to provide a detailed analysis.

3.1. Tidal Stream Generator

The main part of the tidal stream generator is the turbine. To understand the effect of blade rotation, turbine modelling method called Immersed Body Force (IBF) has been introduced [20]. The F_b Function is used to represent the force generated by the turbine. This force creates flows with different momentums and rotational speeds. This force F_b can be represented as the sum of two forces F_D and F_L .

As shown in Fig. 2 (a) and (b), the body force is considered as uniform throughout the volume of the blades [20]. The force generated by the top blade is considered as a drag force. Furthermore, the other two blades consist of both drag and lift forces. An additional force has been used to create a circulation flow [20].

The power output is equal to

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

Turbine	Rotor diameter – 20m
	Power Coefficient – 0.48
	Water density – 1030 kgm ⁻³
Generator	Rated power – 0.91 MW
	Voltage – 6600 V _{rms}
	Frequency – 50Hz

Tab. 1. Turbine and generator specifications

Velocity (m/s)	Power (kW)
1.8	452.92
2.0	621.29
2.2	826.93
2.4	1073.58
2.6	1364.96
2.8	1704.80
3.0	2096.82

Tab. 2. Output power vs stream velocity

where:

P_{ext} – power output from the turbine [W], C_p – Power coefficient, ρ – density [kg/m³], A – the designed turbine area [m²], v – stream velocity [m/s].

Table 1 shows the specifications of the turbine and the generator used in the computation. To identify the velocity diversity the CFD software has been used. The velocity increases dramatically as the fluid passes through the turbine, as shown in Fig. 2. The reason to have a higher velocity values near the blades, is the drag and lift forces acting on the fluid flow [26]. In Tab. 2, the output power corresponding to the stream velocity was presented.

From Fig. 3, it can be seen that the maximum power is generated at maximum velocity. Therefore, the stream velocity is nearly directly proportional to the output power which is supported by other research [1, 2, 5,12, 13, 15].

3.2. Tidal Barrage

To evaluate the power generated from the tidal barrage, some important parameters should be considered. The model includes a gain factor to indicate the effect of the structure. It is related to the velocity of the flow rate as well. The output power P of the tidal barrage is related to the rotational velocity of the rotor ω multiplied by the total torque M produced on all the blades by the water flow.

$$M = F \cdot b \tag{2}$$

where b is the distance from the center of rotation to the point where the force F is being applied [21].

Furthermore, the rotational velocity ω is equal to the relative velocity of the flow V_{rel} over the distance (radius r) between the tip of the blade and the centre of the blade

$$\omega = \frac{V_{rel}}{r} \tag{3}$$

The output power is

$$P = \omega \cdot M \tag{4}$$

To find the torque generated, Morrison’s formula should be used [21]:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V_{rel}^2 \tag{5}$$

where: C_d – Drag coefficient, A – Blade’s surface, V_{rel} – Relative velocity of the flow in respect to the blade.

Maximum power production is achieved when the rotational speed is 30% [21]. The reason is that if the rotor velocity is equal to the flow speed, then no force would be generated because V_{rel}

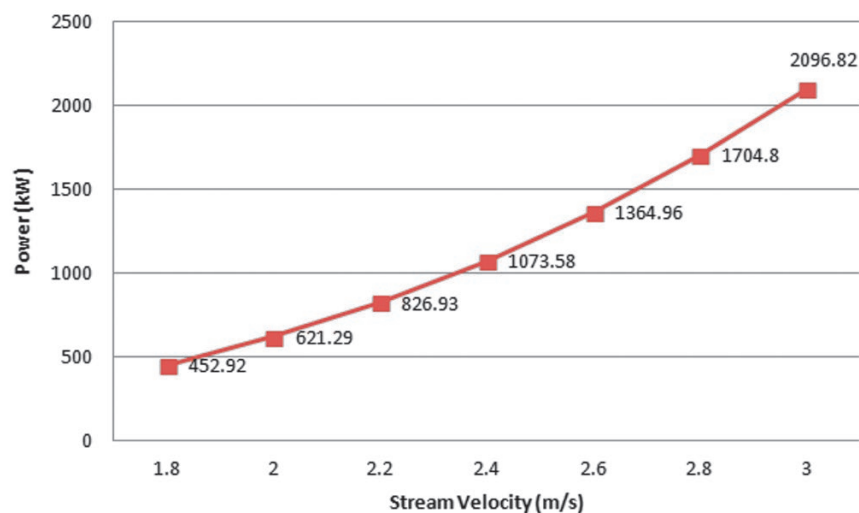


Fig. 3. The power output of the turbine

becomes zero. Therefore, the power generation equation can be rearranged as

$$P = \frac{1}{3} \cdot \omega \cdot M \quad (6)$$

where:

Height of the structure $h = 12$ m

Width of base structure $L = 55$ m

Length of the blades $l = 10$ m

Height of the blades $H_w = 3$ m

Rotor diameter $\phi = 7$ m

Depth of the rotor in the base = 1 m

Water depth = 50 m

To understand the spread velocity near the tidal barrage CFD software has been used.

Equations (3), (4) and (5) are valid under steady condition, but in a real scenario, the blades would not rotate under a steady condition. Therefore, to observe the velocities, the tidal barrage should be simulated without blades and after that, virtual blades should be considered for calculation part [21]. Table 3 and Fig. 4 present the relation between the output power and the stream velocity.

4. Discussion

In the simulation studies, the power output is determined from the speed of the liquid. The simulation was done on the flow of the tidal stream which can be altered as the tidal stream can accelerate, decelerate, and reverse over varying depth. Data is sampled starting from a velocity of 1.8 m/s to up until 3.0 m/s. The simulated tidal stream generator has steady growth on the graph presenting the relationship between the power output and the tidal stream velocity. The power curve shows that the velocity is directly proportional to the output power. The maximum power of 2096 kW is generated when the velocity is at its peak which is 3.0 m/s. The initial growth rate on the graph is almost linear,

Stream velocity (m/s)	Output power (MW)
2.12	0.59
2.50	0.94
3.00	1.67
3.50	2.66

Tab. 3. The output power in relation to the stream velocity

but the increase is quite significant as the velocity increases. The graph documented an increase of 168.37 kW for a velocity change from 1.8 m/s to 2.0 m/s. However, the increase in power is quite significant for a higher velocity. The velocity increase from 2.8 m/s to 3.0 m/s increases the power output by 392 kW. This leads to a conclusion that the power will increase significantly as the value of the stream velocity keeps increasing.

For the tidal barrage analysis, the generator is composed of a cross-flow turbine with a horizontal axis. It is supported by a base structure fixed at the bottom. Data is sampled at instant velocities of: of 4 m/s, 2.12 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s and 3.5 m/s. The output power increases exponentially from 2.21 m/s to its peak at 3.5 m/s. The collected data varies according to the tidal cycle, changing twice a day. The current generated increases as the water level rises, and becomes null at still water level, which is the peak water level. Then, it reverses direction as the water level drops till the still water reaches the lower water level. The tidal stream cycle continues at a certain interval. This interval represents the two peak values of tides of different intensity, occurring every 24 hours.

5. Conclusion

Tidal energy is a clean and renewable source of energy. It is also more predictable in comparison with other energy sources. Using tidal energy, possesses a great potential of producing a huge amount of electrical power.

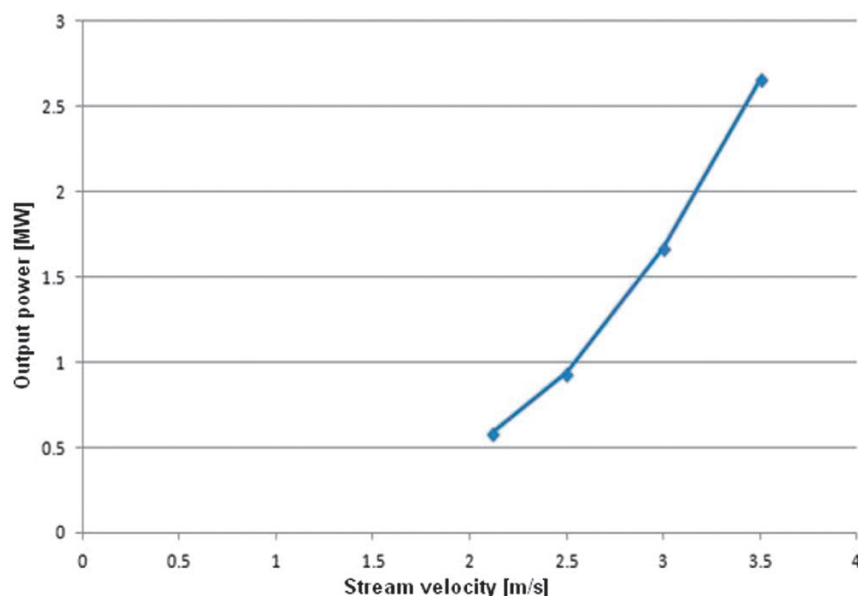


Fig. 4. Power output vs stream velocity

The development of tidal barrage is constrained by its enormous construction cost. However, in the near future, tidal barrage systems may prove to play a key part in worldwide electricity generation, since there is a possibility of a price increase of fossil fuels.

Several potential locations for tidal barrage sites have already been identified, with a potential for producing electrical energy on a large scale. However, so far only four such sites have been constructed, out of many potential tidal barrage locations. There are several sustainability issues with the construction of tidal barrages, such as the harm towards marine life and effects on water quality. Still, the tidal barrage system is considered an established and reliable solution, requiring no breakthrough technology.

On the other hand, a lesser impact on the environment has been observed when using tidal currents in comparison with tidal barrages. However, the full extent of the environmental impact has yet to be discovered. Since tidal current devices are still in the early stage of development, further research and technological advancement are necessary. Among the various technological developments, electricity transmission, maintenance, installation and loading conditions are important to focus on. In order to produce a large amount of electricity using tidal currents, these issues need to be seriously focused on.

REFERENCES

1. Hammons T.J., Tidal power, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 81, 1993, pp. 419–433.
2. Ross R., Tidal Stream Generator, ed: Google Patents, 2012.
3. Rourke F.O., Boyle F., Reynolds A., Tidal energy update 2009, *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 398–409, 2010.
4. Miller G.R., The flux of tidal energy out of the deep oceans, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 71, 1966, pp. 2485–2489.
5. Bowley W.W., Underwater power generator, ed: Google Patents, 1983.
6. Blanchfield J. et al., Tidal stream power resource assessment for Masset Sound, Haida Gwaii, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*, Vol. 222, 2008, pp. 485–492.
7. Salter S., Taylor J.M., Vertical-axis tidal-current generators and the Pentland Firth, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*, Vol. 221, 2007, pp. 181–199.
8. Bryden I., Melville G., Choosing and evaluating sites for tidal current development, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*, Vol. 218, 2004, pp. 567–577.
9. Fraenkel P.L., Tidal current energy technologies, *Ibis*, Vol. 148, 2006, pp. 145–151.
10. O'Doherty T. et al., An assessment of axial loading on a five-turbine array, *Proceedings of the ICE-Energy*, Vol. 162, 2009, pp. 57–65.
11. Batchelor M., Feasibility of offshore wind in Australia, Murdoch University, 2012.
12. Li Y., Calisal S.M., Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine, *Renewable energy*, Vol. 35, 2010, pp. 2325–2334.
13. Zobia, Ahmed F., and Ramesh C. Bansal. Handbook of renewable energy technology. World Scientific, 2011.
14. Prandle D., Design of tidal barrage power schemes, *Proceedings of the ICE-Maritime Engineering*, Vol. 162, 2009, pp. 147–153.
15. Jwo-Hwu Y., Electric power generation at the ebb tide, *Electric Power Systems Research*, Vol. 48, 1998, pp. 31–35.
16. Hooper T., Austen M., Tidal barrages in the UK: Ecological and social impacts, potential mitigation, and tools to support barrage planning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 23, 2013, pp. 289–298.
17. Kjerfve B., Magill K.E., Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons, *Marine geology*, Vol. 88, 1989, pp. 187–199.
18. Dronkers J., Zimmerman J., Some principles of mixing in tidal lagoons, *Oceanologica Acta*, Special issue, 1982.
19. Supino G., The propagation of the tide inside a lagoon, *Meccanica*, Vol. 5, 1970, pp. 42–53.
20. Gebreslassie M.G., Tabor G.R., Belmont M.R., CFD simulations for investigating the wake states of a new class of tidal turbine, *Journal of Renewable Energy and Power Quality*, Vol. 10, 2012.
21. Parmeggiani S. et al., Power Production and Economical Feasibility of Tideng Tidal Stream Power Converter, Department of Civil Engineering, Aalborg University 2010.
22. Frau J.P., Tidal energy: promising projects: La Rance, a successful industrial-scale experiment, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, Issue 3, 1993, pp. 552–558.
23. Blunden L., Bahaj A., Tidal energy resource assessment for tidal stream generators, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*, Vol. 221, 2007, pp. 137–146.
24. Neill S.P. et al., The impact of tidal stream turbines on large-scale sediment dynamics, *Renewable Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 2803–2812.
25. Masselink G., Short A.D., The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model, *Journal of Coastal Research*, No. 9(3), 1993, pp. 785–800.
26. Kashem, S.B.A., Sheikh, M.I.B., Ahmed, J. and Tabassum, M., 2018, April. Gravity and buoyancy powered clean water pipe generator. In 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018) (pp. 1–5). IEEE.
27. Chakraborty, Sumit & Dzielendziak, Agnieszka & Koroglu, Turgay & Yang, Kun. (2013). Evaluation of smart eco-friendly public transport options in coastal cities: towards a green future for the city of Southampton.

Saad bin Abul Kashem

Qatar Armed Forces – Academic Bridge Program, Qatar Foundation, Doha, Qatar

e-mail: skashem@qf.org.qa

Dr. Saad Kashem received his Ph.D. degree in Robotics and Mechatronics from Swinburne University of Technology (SUT), Melbourne, Australia, in 2013. He received his B.Sc. in Electrical and Electronic Engineering from East West University, Bangladesh, back in 2008. At present, he is working as a Robotics and Advanced Computer Skills Faculty at Qatar Armed Forces – Academic Bridge Program, Qatar Foundation in Qatar. He is also a Visiting Research Fellow in Electrical & Computer Engineering at Texas A&M University at Qatar and a Visiting Assistant Professor at Presidency University in India. As a Lecturer in the Electrical Engineering department (Robotics and Mechatronics Engineering panel) at Swinburne University of Technology in Australia (1st October 2014 to 27th July 2017), he had been convener, moderator, and instructor of different courses. He has over eleven years' experience in both industry and academia. Dr. Saad has already published 51 articles in the form of Book, Book Chapter, Journal and Conference Proceedings. He is a professional member of Institution of Engineering and Technology, UK (IET), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), IEEE Robotics and Automation Society, and International Association of Engineers (IAENG). He is an editorial board member and reviewer of many international reputed Journals such as Journal of Electrical and Electronic Engineering (USA), IEEE Transactions on Control Systems Technology (USA), Vehicle System Dynamics, Taylor and Francis Ltd, (UK) etc.

Molla E. Majid

Academic Bridge Program, Qatar Foundation, Doha, Qatar

e-mail: mmajid@qf.org.qa

He is currently pursuing his Ph.D. from Curtin University, Perth, Western Australia. He has a Master's in Computing from University of Wollongong, Australia and a Master's in Teaching from Western Sydney University in Australia. Molla has completed his Bachelor's in Engineering from Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET). Molla has over 11 years of industry, teaching and training experience in the areas of general ICT, MIS and BI. Molla taught in multiple secondary and tertiary educational institutions in Australia and overseas. He is a member of the Australian Computer Society (ACS) and Teacher Registration Board of Western Australia (TRBWA). His research interests include Sustainability, ICT, MIS, Business Intelligence, Big Data and Data Science.

Mujahid Tabassum

Masters in ICT

Higher College of Technology, Muscat

e-mail: mujahid.tabassum@hct.edu.om

He is a Computer Network, lecturer in Higher College of Technology, Muscat, Oman. He is pursuing PhD from the University Sains Islam, Malaysia. He has completed a MSc Computer System Engineering (Specialization in Computer Network's) degree from the Halmstad University, Sweden and bachelor degree from the University of Wollongong, Australia. He is a qualified "Chartered Engineer – CEng" registered with the Engineering Council, UK. He has 12 years of teaching experience. He is a Cisco CCNA, Security and IoT certified instructor. His research interests include Computer Networks, AI, Wireless Sensor Network, IoT, Security and Applications. He has published several Scopus papers, journals and a book chapter. He is a Member of IEEE, Member of Institution of Engineering and Technology, Member of IAENG, Member of Australia Computing Society (ACS) and Member of MBOT Malaysia.

Azad Ashraf

Dept. of Chemical Engineering and Process Technology, College of North Atlantic, Qatar

Professor of Qatar University

e-mail: azad.ashraf@cna-qatar.edu.qa

He has more than 18 years of experience in research & development, industry and academia. He received his Bachelor degree in Chemical Engineering from University of South Alabama in USA and Masters in Environmental Science from University of Toronto in Canada. At present he is working as a faculty at College of North Atlantic Qatar where he is teaching chemical process engineering and environmental science related subjects focusing on sustainable development and renewable energy. Prior to his current role Mr. Azad worked on energy audit research at McMaster University in Canada, he also worked in various waste water treatment industries as well as solid waste treatment facilities in Canada. After his graduation in the USA he worked for Union Carbide, Dow Chemicals and General Electric in the US where he was responsible for research and development in hydraulic fluid and rigid foam. Mr. Azad also worked for the United Nations as an environmental officer where he was stationed in Haiti. He has been teaching as a lecturer and instructor since 2007 in various Universities and Technical colleges in Canada, Bangladesh, UK and Qatar. He is a professional member of various organizations and co-author of 11 technical papers. He has also presented conference papers in the USA for Society of Tribology and Lubrication Engineering (STLE) and Society of Automotive Engineers (SAE). His current research interests include renewable energy, waste management, sustainable development in smart city concepts as well as research in the oil and gas industry.

Jarosław Guziński

Gdańsk University of Technology, Electrical and Control Engineering Faculty

e-mail: jaroslaw.guzinski@pg.edu.pl

He got Ph.D. and D.Sc. degrees from the Electrical Engineering Department at Technical University of Gdańsk. Currently he is the head of the Department of Electric Drives and Energy Conversion. In 2012 he was awarded by Polish Academy of Sciences – Division IV: Engineering Sciences for his monograph “Electric drives with induction motors and inverters output filters – selected problems”. He has authored and co-authored more than 160 journal and conference papers. His interests include sensorless control of electrical machines, multiphase drives (5-phase), inverter output filters, renewable energy, and electrical vehicles. Dr. Guziński is a Senior Member of IEEE.

Krzysztof Łuksza

Gdańsk University of Technology, Electrical and Control Engineering Faculty

e-mail: krzysztof.luksza@pg.edu.pl

He received his master's degree from the Electrical Engineering Department at Technical University of Gdańsk, at the Department of Electric Drives and Energy Conversion. He is pursuing PhD in sensorless control of permanent magnet multiphase machines. His field of research includes: sensorless control of electrical machines, state observers, multiphase drives (5-phase), and electrical vehicles.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–14. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Przegląd i analiza elektrowni pływowych

Autorzy

Saad bin Abul Kashem
Molla E. Majid
Mujahid Tabassum
Azad Ashraf
Jarosław Guziński
Krzysztof Łuksza

Słowa kluczowe

energia odnawialna, pływy morskie, zrównoważony rozwój, strumień pływowy, laguny pływowe, Computational Fluid Dynamics, SolidWorks

Streszczenie

W przyszłości dla pozyskiwania energii opartego na zrównoważonym rozwoju istotną rolę może mieć energia pływów morskich. Energia ta jest rezultatem grawitacyjnego oddziaływania Ziemi, Księżyca i Słońca oraz sił odśrodkowych wytwarzanych przez układ Ziemia–Księżyc. Zapory pływowe do produkcji energii elektrycznej wykorzystują energię potencjalną fal. Przy użyciu turbin wodnych do generowania elektryczności można wykorzystać także energię kinetyczną prądów pływowych. Jednak wykorzystanie tego rodzaju technologii do produkcji energii elektrycznej na dużą skalę nie jest na razie ekonomicznie uzasadnione. Należy zauważyć, że rozwój tej technologii jest jeszcze na wczesnym etapie rozwoju. W niniejszym artykule omówiono wytwarzanie energii elektrycznej z pływów morskich przy zastosowaniu różnych technologii. Przeprowadzono wstępne badania symulacyjne przykładowego generatora pływowego oraz zapory pływowej z użyciem programów Computational Fluid Dynamics i SolidWorks. Przedstawiono także niektóre wyzwania związane z projektowaniem i budową systemów konwersji energii pływów morskich.

Data wpływu do redakcji: 3.10.2019

Data wpływu do redakcji po recenzjach: 13.11.2019

Data akceptacji artykułu: 4.12.2019

Data publikacji online: 27.07.2020

1. Wprowadzenie

Jednym ze źródeł energii odnawialnej jest energia pływów morskich. Przypływy i odpływy można wykorzystać do przemiany energii kinetycznej wody w energię elektryczną. Energia pływów wykorzystuje ruchy wody powodowane przez oddziaływania grawitacyjne pomiędzy Ziemią, Księżycem i Słońcem oraz ruch obrotowy układu Ziemia–Księżyc. Wytwarzanie energii elektrycznej realizowane jest w generatorze, który przekształca energię mechaniczną na elektryczną, przejmując energię kinetyczną prądów lub pływów morskich [1–5].

Energia pływów morskich, w porównaniu z energią wytwarzaną z paliw kopalnych, nie powoduje emisji gazów cieplarnianych, jak też zapylenia czy zadymienia powietrza. Dlatego uznawana jest za czyste źródło energii elektrycznej. Obecnie dostępne są trzy rodzaje systemów wykorzystujących energię pływów morskich: strumienie

pływowe, zapory pływowe i laguny pływowe. W artykule tym omówiono wszystkie z nich i dokonano ich porównania.

Turbiny wiatrowe czerpią energię z prądów powietrznych, a generatory pływowe z prądów wodnych. Jednak pojedyncza turbina pływowa może wytwarzać więcej energii niż turbina wiatrowa [2].

Zapora pływowa wykorzystuje różnicę wysokości wody (ΔH) podczas przypływów i odpływów i związaną z tym zmianę energii potencjalnej. Wymaga to odpowiedniego rozmieszczenia poszczególnych zapór, aby umożliwić wytwarzanie energii elektrycznej [3].

Nowsze rozwiązanie służące do wykorzystania energii pływów polega na budowie okrągłych zbiorników (lagun) otoczonych turbinami. Takie sztucznie utworzone zbiorniki są podobne do zapór pływowych, ale nie mają praktycznie żadnego własnego naturalnego ekosystemu [1].

Elektrownia pływowa stanowi pewną formę elektrowni wodnej o niskim spadzie. Technologia ta jest dobrze rozwinięta, ale główną jej wadą są koszty budowy. Okres budowy elektrowni pływowej może być znaczny, a koszty inwestycyjne bardzo wysokie [1]. Chociaż energia pływów jest energią odnawialną, także i ona może w pewien sposób oddziaływać na środowisko naturalne.

Użycie generatorów pływowych może przyczynić się do zachowania naturalnych światowych zasobów paliw kopalnych. Dzięki temu ograniczona zostanie emisja gazów cieplarnianych. Po wybudowaniu elektrowni pływowej energia uzyskiwana z pływów morskich będzie praktycznie darmowa. Elektrownie z generatorami pływowymi mogą wytwarzać znaczny procent energii na potrzeby niektórych krajów o korzystnych warunkach brzegowych. Wytwarzanie energii z pływów odbywa się ze znaczną sprawnością, ponieważ

na energię elektryczną zamienia się ok. 80% energii kinetycznej pływów, podczas gdy w konwencjonalnych elektrowniach ciepłych sprawność jest mniejsza niż 50% [23]. Trzeba wziąć jednak pod uwagę fakt, że koszty budowy elektrowni pływowych mogą rosnąć na skutek uszkodzeń urządzeń w wyniku silnych burz morskich i korozji spowodowanej słoną wodą. Niekiedy wahania pływów będące skutkiem ruchu falowego mogą, niestety, znacznie zmniejszyć sprawność generatorów pływowych [24].

2. Energia pływów

Jak napisano we wprowadzeniu, pływy morskie można wykorzystać do generowania energii elektrycznej. Podnoszenie się i opadanie poziomu wody w morzach jest skutkiem oddziaływania grawitacyjnego Słońca, Księżyca i Ziemi oraz ruchu obrotowego układu Ziemia–Księżyc. Należy zauważyć, że grawitacyjne oddziaływanie Księżyca na Ziemię jest ok. 2,2 razy większe niż Słońca, ponieważ jest on bliżej Ziemi i z tego powodu ma większe znaczenie przy pływach morskich [4].

Zjawisko pływów zachodzi dwa razy dziennie, a czas trwania zależy od wzajemnego położenia ciał niebieskich i lokalnych warunków topograficznych. Dzięki sile grawitacji pochodzącej od Księżyca woda może się wybrzuszać po stronie Ziemi bliższej Księżycowi. W ten sam sposób obrót układu Ziemia–Księżyc, który wytwarza siłę odśrodkową, powoduje kolejne wybrzuszenie wody po tej stronie Ziemi, która jest najdalej od Księżyca. Kiedy jakiś obszar znajduje się w położeniu na wprost układu Ziemia–Księżyc, jego wody są w stanie przyprływu, zwanego także pływem syzygijnym. Gdy obszar jest w położeniu prostopadłym do tego układu, jego wody podlegają odpływowi, zwanemu także pływem kwadrantowym. A zatem podczas jednego obrotu Ziemi każdy obszar doznaje dwóch przyprływów i dwóch odpływów. Ponieważ Księżyc krąży wokół Ziemi, to czasy tych pływów w różnych punktach Ziemi będą się różnić, co dzieje następując o ok. 50 minut później [4].

2.1. Strumienie pływowe

Generator pływowy to maszyna, która do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystuje strumienie prądów podmorskich. W generatorach pływowych ruch wody i jego energia kinetyczna

wykorzystywana jest do obracania turbin. W generatorze pływowym zastosowano koncepcję turbiny wiatrowej. Ponieważ gęstość wody jest większa niż powietrza, w generatorze pływowym można wytwarzać więcej energii niż w turbinie wiatrowej o tej samej powierzchni roboczej [2]. Generatory pływowe stawia się tam, gdzie występują silne prądy morskie, aby generować jak najwięcej energii elektrycznej. Siły oddziałujące na oceany wytwarzają prąd oceaniczny i nadają kierunek ruchowi wody morskiej [5]. Jest to wynikiem takich zjawisk, jak: stałe wiatry, efekt Coriolisa wywołany ruchem obrotowym Ziemi, wzrost gęstości strumienia wody powstałego ze zmieszania dwóch strumieni (tzw. *cabbeling*) oraz różnic temperatur i zasolenia. Na natężenie i kierunek tych prądów wpływają też: profil głębokości, interakcja z innymi prądami i konfiguracja linii brzegowej. Prądy denne powodują przemieszczenie i sortowanie osadów, wpływając w ten sposób na rodzaj dna, jakie tworzy się w obszarach miękkich lub twardych, drobno- lub gruboziarnistych. Materiał dna wpływa na środowisko organiczne, które może się rozwijać na danym obszarze [6, 7].

Umieszczenie turbin w morzu to skomplikowany proces, ponieważ generatory pływowe są duże i mogą zakłócać pływy, które mają wykorzystywać. Turbiny elektrowni pływowej ustawia się pod wodą w rzędach, podobnie jak na niektórych farmach wiatrowych. Najbardziej odpowiedni dla generatorów pływowych zakres prędkości przepływów wynosi od 3,6 do 4,9 węzła (4 do 5,5 mil na godzinę) [8]. Idealnym miejscem dla farm turbin pływowych są wody o głębokości od 20 do 30 metrów [8].

Generatory pływowe nie są tak popularne jak turbiny wiatrowe, ale nieustannie są rozwijane co do liczby i mocy. Np. w grudniu 2008 roku w Irlandii zbudowano generator pływowy o mocy ok. 12 MW [3].

Turbiny osiowe

Turbiny osiowe składają się z zestawu wirników. Mają łopaty o stałym skoku i wysokiej sprawności. Aby turbina osiowa się obracała, potrzebny jest pływ wody [9, 10]. Pierwszą zainstalowaną turbiną osiową była turbina typu AR-1000 o mocy 1 MW i prędkości obrotowej 2,65 m/s. Została ona skonstruowana w firmie Atlantis Resources

Corporation. Ponadto w Marine Current Turbine w Strangford Lough, w Irlandii Północnej, w kwietniu 2008 roku zainstalowano prototyp SeaGen o mocy 1,2 MW [3]. SeaGen składa się z dwóch osiowych wirników przepływowych. Generator napędzany jest przez jeden wirnik. Ponieważ skok łopatek wirnika można regulować w zakresie do 180 stopni, turbiny te mogą efektywnie wytwarzać energię elektryczną [3]. Również firma Tenax Energy z Australii uzyskała zlecenie na budowę 450 turbin w pobliżu australijskiego miasta Darwin. Zaproponowano użycie turbin osiowych z wirnikiem o średnicy 15 m. Turbiny będą miały grawitacyjną podstawę. Ten typ turbiny może pracować w głębokiej wodzie, poniżej kanałów żeglugowych. Szacuje się, że każda taka turbina może zasilać od ok. 300 do 400 domów [11]. Brytyjska firma Tidal Stream rozpoczęła budowę osiowej turbiny (Triton 3) na Tamizie [3]. Pełnowymiarowa turbina Triton 3 ma moc 3 MW, zaś Triton 6 – 10 MW.

Turbiny przepływowe z osią pionową i poziomą

Turbiny tego rodzaju można instalować pionowo lub poziomo. Taka konstrukcja umożliwia produkcję elektryczności z każdego głębokiego prądu wody – zarówno rzeczno, jak i pływowego. Konstrukcję tę zastosowano w Korei Południowej do budowy turbiny o przepływie krzyżowym, rozbudowanej do mocy 90 MW.

Turbiny ze zwiększonym przepływem (flow augmented)

W turbinach tego rodzaju do zwiększenia przepływu stosuje się stopniowe zwężenie stojana. Dzięki temu rośnie przepływ i zwiększa się moc wyjściowa turbiny. Tego rodzaju turbiny zaczęła wprowadzać na rynek pewna firma z Australii. Według obliczeń dwie turbiny o zwiększonym małym przepływie generowałyby 3,5 MW [13].

2.2. Zapora pływowa

Zapora pływowa to rozwiązanie, które polega na budowie systemów zapór, śluz, kanałów i turbin, które lokalnie blokują pływy i je wykorzystują w sposób kontrolowany. W zaporze zagospodarowywana jest energia potencjalna oceanu przez przechwytywanie wody podczas przyprływu i jej późniejsze przechowywanie. Zapora budowana jest w porzek zatoki, fiordu lub ujścia rzeki, tworząc

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–14. When referring to the article please refer to the original text.

PL

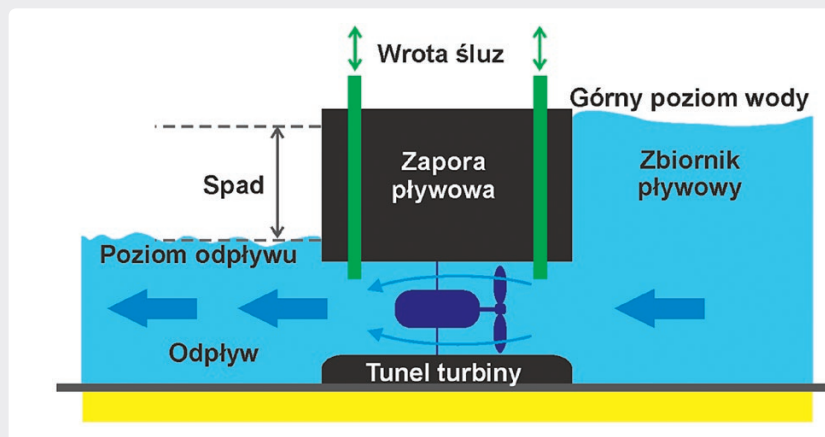
zamknięty zbiornik pływowy. Najniższa część zapory znajduje się na dnie morskim, a szczyt zapory na poziomie maksimum rocznego pływów. Morska woda przepływa przez podwodny tunel w zaporze pływowej, w którym umieszczona jest turbina z generatorem i wrotami na wejściu i wyjściu. W zaporze umieszczone są też śluzy do napełniania i opróżniania zbiornika poza systemem kanałów i turbin. Co do podstawowej zasady działania to zaporę pływową jest podobna do elektrowni wodnej przepływowej, z tą różnicą, że woda przez zaporę pływową może przepływać w dwóch kierunkach, podczas gdy w elektrowni wodnej tylko w jednym. Zbiornik pływowy napełniany może być podczas przyprływu, a opróżniany podczas odpływu [14]. Działanie zaporę pływowej ograniczone jest do 6 godzin na cykl pływowy.

Zaporę pływową jest atrakcyjna, ponieważ ma bardzo długi czas eksploatacji, a po wybudowaniu produkuje tanią energię elektryczną. Jednak koszt inwestycyjny budowy nowej zaporę jest bardzo wysoki, a jej oddziaływanie na przyrodę może być znaczne.

Zaporę pływową wykorzystuje naturę pływów, które podnoszą się i opadają w wyniku grawitacyjnego oddziaływania między Ziemią, Słońcem i Księżycem. Zjawiska te sprawiają, że morska woda przemieszcza się odpowiednio w kierunku Słońca i Księżyca. Ten ruch morskiej wody powoduje podwyższenie się poziomu wody w morzu. Jednak na otwartym oceanie poziom wody podnosi się niewiele, a istotne znaczenie ma jedynie na wybrzeżu. Wynika to z nachylenia dna morskiego przy brzegu. Powoduje to kierowanie wody do zatok, fiordów i ujść rzek. Produkcja energii elektrycznej z zaporę pływowej wykorzystuje spadek pływów, czyli różnicę w pionie pomiędzy poziomem odpływu i przyprływu. Z różnicy wysokości przyprływów i odpływów wynika energia potencjalna pływów. Tę różnicę w poziomie wody po obu stronach tamy wykorzystuje się do wytwarzania energii elektrycznej. Zaporę pływowa może działać w trzech trybach generacji: przy odpływie, przy przyprływie i w trybie dwukierunkowym [14].

Generacja przy odpływie

Generacja na zaporze pływowej przy odpływie wykorzystuje pływy opadające (odpływy). Basen pływowy wypełniany jest przez otwarte śluzy w tempie



Rys. 1. Generacja energii w zaporze pływowej podczas odpływu [3, 27]

określonym przez nadchodzącą falę przyprływu. Śluzy są następnie zamknięte, gdy poziom morza w basenie osiąga maksimum przyprływu, i zatrzymuje się morską wodę w zbiorniku. Gdy poziom wody poza basenem obniży się podczas odpływu, między wyższym poziomem wody zamkniętej w zbiorniku a rzeczywistym poziomem wody w oceanie powstanie różnica poziomów zwana spadem [15]. Taki spadek wystarczy do zainicjowania wytwarzania energii elektrycznej. Następnie wrota tuneli turbin są otwierane, aby umożliwić przepływ wody. Turbiny będą wytwarzać energię elektryczną, dopóki różnica poziomów się nie zmniejszy. Następnie turbiny zostaną wyłączone, a wrota zamknięte. Kolejno otwierane są potem śluzy zaporę i cykl się powtarza. Na rys. 1 schematycznie przedstawiono działanie zaporę pływowej podczas odpływu [3, 27].

Generacja przy przyprływie

Gdy fale przyprływu zbliżają się do lądu, woda zaczyna wpływać do zbiornika przez otwarte wrota tuneli turbin. Kiedy woda wpływa przez tunel, turbina obraca się i wytwarzana jest energia elektryczna [14]. Z chwilą, gdy przyprływ osiągnie swój maksymalny poziom, wrota zostają zamknięte. Gdy tylko poziom wody przed zaporą opadnie, otwierane są śluzy, aby uwolnić zgromadzoną wodę.

Do generowania energii elektrycznej przy przyprływie stosuje się turbiny wolnoobrotowe, ponieważ przepływ wody przez tunel do basenu pływowego jest procesem powolnym. Ten powolny cykl napełniania jest korzystny dla ekosystemu, ponieważ żywe organizmy

morskie mogą przedostawać się do zamkniętego basenu bez narażenia na działanie szybko obracających się turbin. Po napełnieniu basenu pływowego podczas przyprływu otwierane są następnie śluzy, co pozwala całej nagromadzonej wodzie powrócić do morza.

Tego rodzaju wykorzystanie energii pływowej jest mniej wydajne w porównaniu z generacją przy odpływie, ponieważ podczas generacji energii elektrycznej różnica poziomu wód zmniejsza się szybciej.

Generacja dwukierunkowa

W generacji dwukierunkowej do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystuje się zjawiska zarówno przyprływu, jak i odpływu. Wymaga to lepszego wykorzystania wrot śluz i bardziej złożonego sterowania. Przy odpływie morska woda wpływa lub wypływa przez ten sam system wrot. Turbina obraca się w obu kierunkach wraz z przepływem wody [16].

Główną wadą tego rozwiązania jest mniejsza sprawność wytwarzania energii elektrycznej. Ponadto konstrukcja i automatyzacja dwukierunkowej produkcji energii jest droższa i mniej wydajna.

2.3. Laguny pływowe

Laguna pływowa to sztuczna budowla połączona z oceanem poprzez jeden lub więcej wlotów, wzniesiona w celu zamknięcia pływowego obszaru morza i wytwarzania energii elektrycznej w turbinach wodnych. Laguny pływowe mają różne głębokości i można je znaleźć na wszystkich kontynentach. Turbiny wodne umieszcza się w betonowych kasetonach i trwale zanurza w wodzie [17].

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–14. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Kiedy poziom wody osiągnie pożą-
dany spad, otwiera się śluzy i woda
wplywa do laguny [18]. Woda z laguny
przepływa przez turbiny, wytwarzając
energię elektryczną. W lagunach pływ-
owych energię elektryczną wytwarza się
dwa razy, tj. przy przyptywie i odpływie.
Zakłada się, że laguny są czynne średnio
przez 14 godzin dziennie [18].

Schemat przepływu pływów jest prze-
widowywalny, a więc wytwarzanie energii
z lagun pływowych jest niezawodne [18].
Ponieważ laguny można budować
z naturalnych materiałów, ich oddzia-
ływanie na środowisko naturalne jest
niewielkie, mniejsze niż przy budowach
wykonywanych z betonu. Umocnienie
laguny może służyć jako niski falochron
podczas odpływu i zanurzać się
w wodzie podczas przyptywu. Dzięki
temu mniejsze ryby mogą pływać bez
żadnych przeszkód.

Istnieją dwie opcje projektowania umoc-
nień laguny. Pierwsza wykorzystuje
materiał piaszczysty, który jest używany
przy wielu budowach morskich [19].
W drugiej materiałem jest urobek
z kamieniołomów, podobnie jak przy
umocnieniach wybrzeży portów. W obu
przypadkach na szczycie wału laguny
umieszcza się duże skały, aby zabezpie-
czyć je przed degradacją.

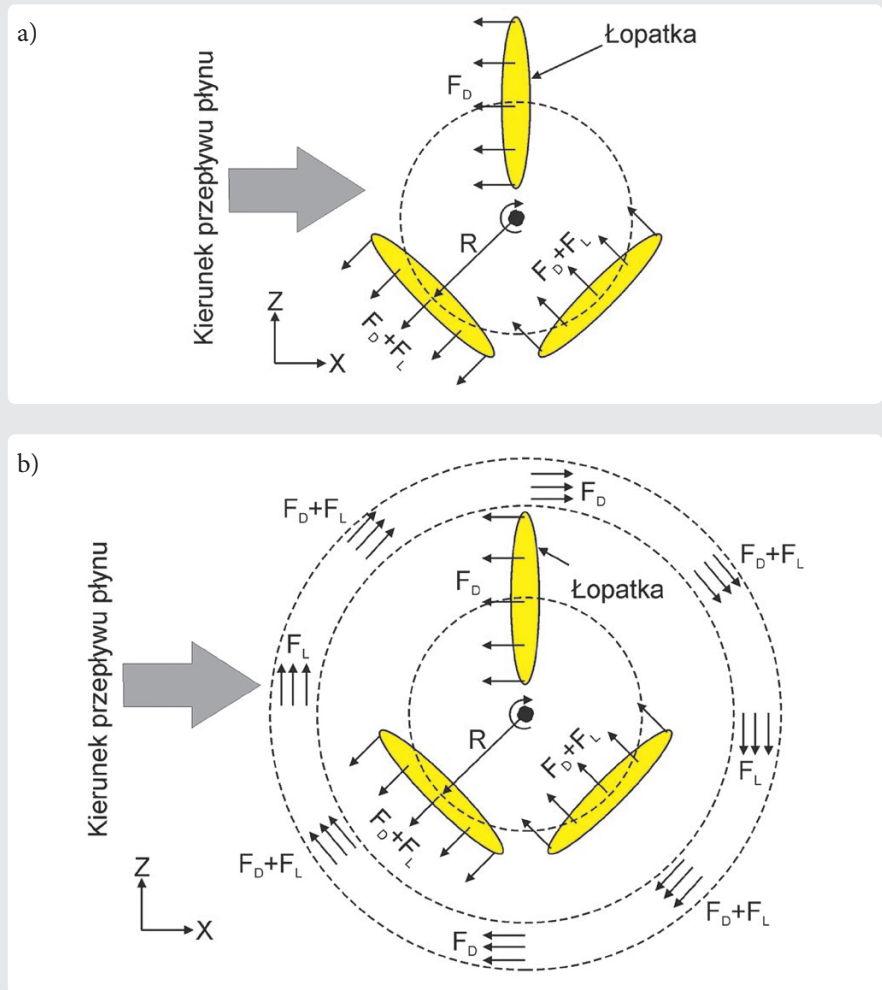
Niestety, wydajność energetyczna laguny
pływowej jest stosunkowo niska. Co
więcej, budowa laguny jest kosztowna
i wymaga uwzględnienia wielu uwarun-
kowań, takich jak różnorodność biolo-
giczna, teren budowy itp. Dlatego wciąż
brak czynnych elektrowni na lagunach
pływowych [25–27].

3. Symulacja

Coraz więcej prac naukowych zawiera
analizę zasobów elektrowni pływowych
z wykorzystaniem metod modelowania
i symulacji. W niniejszej pracy przedsta-
wiono symulację generatora pływowego
i zapory pływowej. W tym celu wyko-
rzystano oprogramowanie SolidWorks
(2015) i Computational Fluid Dynamics
(CFD).

3.1. Generator pływowy

Głównym elementem generatora
pływowego jest turbina. Aby przeana-
lizować wpływ obrotu łopat, zasto-
sowano program do modelowania
turbiny o nazwie Immersed Body Force
(IBF) [20]. Siłę generowaną przez
turbiny reprezentuje funkcja F_b . Siła ta
tworzy przepływy o różnych pędach
i prędkościach obrotowych, a można ją



Rys. 2. (a) Kierunek siły łopaty turbiny; (b) Kierunek siły z siłą dodatkową [20]

przedstawić jako sumę dwóch sił $F_b = F_D + F_L$.

Jak pokazano na rys. 2a i 2b, siłę masową
uznaje się za jednorodną w całej obję-
tości łopat [20]. Siłę wywieraną przez
górną łopatkę uważa się za siłę oporu
hydrodynamicznego. Pozostałe dwie
łopatki wywierają zarówno siłę oporu,
jak i siłę nośną. Do wytworzenia
przepływu cyrkulacyjnego użyto siły
dodatkowej [20].

Moc wyjściowa określona jest
zależnością:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

gdzie:

P_{ext} – moc wyjściowa turbiny [W],
 C_p – współczynnik mocy,
 ρ – gęstość [kg/m³], A – projektowana
powierzchnia turbiny [m²], v – prędkość
strumienia [m/s].

Turbina	Średnica wirnika – 20 m
	Współczynnik mocy – 0,48
	Gęstość wody – 1030 kgm ⁻³
Generator	Moc znamionowa – 0,91 MW
	Napięcie – 6600 V _{rms}
	Częstotliwość – 50 Hz

Tab. 1. Dane turbiny i generatora

W tab. 1 przedstawiono dane turbiny
i generatora wykorzystane w oblicze-
niach. Do rozpoznania różnic prędkości
zastosowano oprogramowanie CFD.
Prędkość gwałtownie wzrasta, gdy płyn
przechodzi przez turbinę, jak pokazano
na rys. 2. Powodem zwiększenia prę-
dkości w pobliżu łopat są siła oporu i siła
nośna, działające na przepływy płynu [26].
W tab. 2 przedstawiono moc wyjściową
odpowiadającą prędkości tego strumienia.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–14. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Prędkość [m/s]	Moc [kW]
1,8	452,92
2,0	621,29
2,2	826,93
2,4	1073,58
2,6	1364,96
2,8	1704,80
3,0	2096,82

Tab. 2. Moc wyjściowa w zależności od prędkości strumienia

W charakterystyce przedstawionej na rys. 3 można zauważyć, że maksymalna moc generowana jest przy maksymalnej prędkości i prędkość strumienia jest prawie wprost proporcjonalna do mocy wyjściowej, co też potwierdzają inne badania opisane w literaturze [1, 2, 5, 12, 13, 15].

3.2. Zapora pływowa

W niniejszej pracy do analizy zapory pływowej przyjęto turbinę o przepływie krzyżowym z osią poziomą. Turbina została umieszczona na osadzonej na dnie podstawie. Aby ocenić moc generowaną z zapory pływowej, należy uwzględnić istotne parametry. Model ten zawiera współczynnik wzmocnienia oznaczający wpływ konstrukcji, związany także z prędkością natężenia przepływu. Moc wyjściowa P zapory pływowej zależy od prędkości obrotowej wirnika ω pomnożonej przez całkowity moment obrotowy M wytwarzany na wszystkich łopatach przez przepływ wody:

$$M = F \cdot b \quad (2)$$

gdzie b jest odległością od środka obrotu do punktu przyłożenia siły F [21].

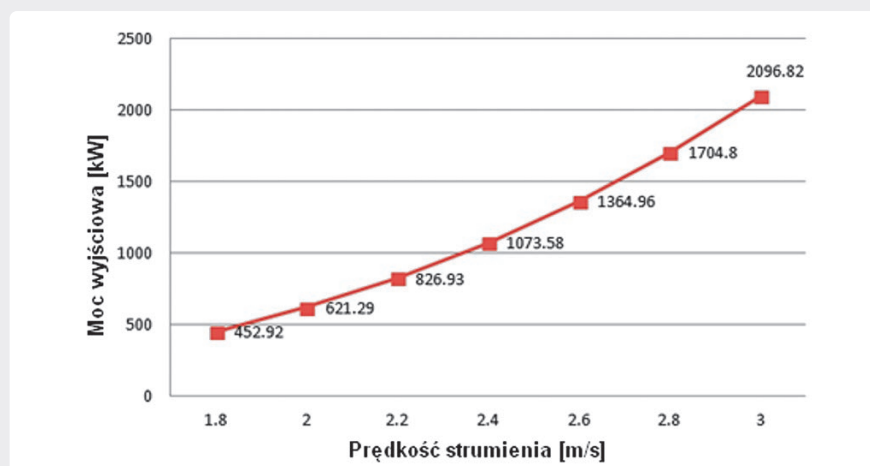
Ponadto prędkość obrotowa ω jest równa względnej prędkości przepływu V_{rel} na odcinku (promień r) między wierzchołkiem a środkiem łopaty:

$$\omega = \frac{V_{rel}}{r} \quad (3)$$

Moc generowaną określa zależność:

$$P = \omega \cdot M \quad (4)$$

Aby wyznaczyć generowany moment obrotowy, należy obliczyć siłę, stosując wzór Morrisona [21]:



Rys. 3. Charakterystyka mocy wyjściowej turbiny w zależności od prędkości strumienia

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V_{rel}^2 \quad (5)$$

gdzie: C_d – współczynnik oporu hydrodynamicznego, A – powierzchnia łopaty, V_{rel} – względna prędkość przepływu względem łopaty.

Maksymalną produkcję energii osiąga się, gdy prędkość obrotowa wynosi 30% [21]. Jeśli prędkość wirnika równa jest prędkości przepływu, wówczas nie jest generowana żadna siła, ponieważ V_{rel} przyjmuje wartość zero. Dlatego równanie (4) można przekształcić:

$$P = \frac{1}{3} \cdot \omega \cdot M \quad (6)$$

gdzie:

wysokość zapory $h_z = 12$ m
szerokość podstawy zapory $L = 55$ m
długość łopat $l = 10$ m
wysokość łopat $H_w = 3$ m
średnica wirnika $\phi = 7$ m
głębokość wirnika w podstawie = 1 m
głębokość wody $h_w = 50$ m

Aby przeanalizować prędkość rozpręstrzenia się płynu w pobliżu zapory pływowej, zastosowano oprogramowanie CFD.

Równania (4), (5) i (6) obowiązują w warunkach ustalonych, w rzeczywistym scenariuszu łopaty nie obracałyby się w warunkach ustalonych. Dlatego, aby zaobserwować te prędkości, należy symulować zapórę pływową bez łopat, a następnie w obliczeniach uwzględnić łopaty wirtualne [21]. W tab. 3 i na rys. 4 przedstawiono zależność między mocą wyjściową a prędkością strumienia.

Prędkość strumienia (m/s)	Moc wyjściowa (MW)
2,12	0,59
2,50	0,94
3,00	1,67
3,50	2,66

Tab. 3. Moc wyjściowa w zależności od prędkości strumienia

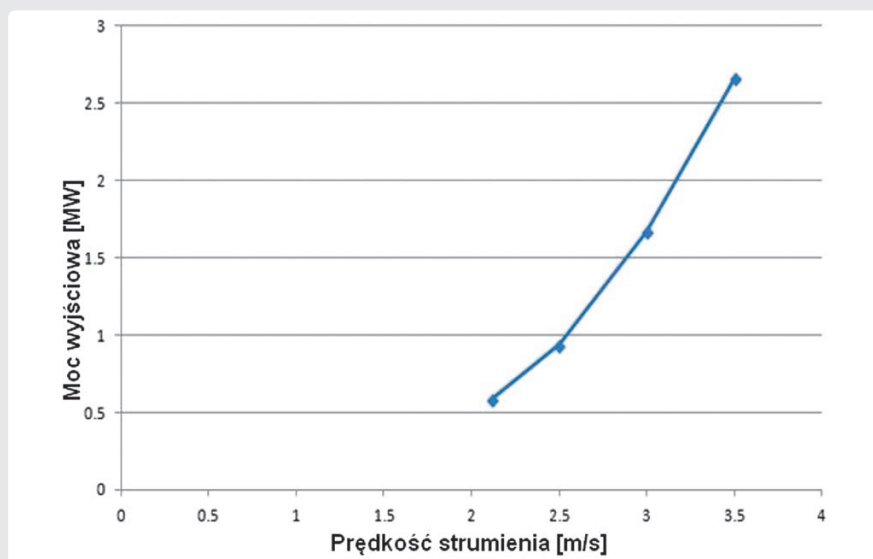
4. Dyskusja

W badaniach symulacyjnych moc wyjściową określa się na podstawie prędkości cieczy. W niniejszej pracy symulacje generatora pływowego przeprowadzono dla przepływu strumienia pływowego zmienianego odpowiednio dla różnych głębokości. Użyto prędkości w zakresie od 1,8 m/s do 3,0 m/s. Na wykresie zależności między mocą wyjściową a prędkością strumienia pływowego można zauważyć stały wzrost (rys. 3). Krzywa mocy wskazuje, że moc wyjściowa jest prawie liniowo proporcjonalna do prędkości strumienia pływowego. Dla maksymalnej prędkości 3,0 m/s generowana jest maksymalna moc 2096 kW. Można zauważyć, że wzrost mocy jest szybszy dla większych prędkości. Przy wzroście prędkości od 2,8 m/s do 3,0 m/s odnotowano wzrost 392 kW, podczas gdy przy zmianie prędkości od 1,8 m/s do 2,0 m/s moc wzrosła jedynie o 168 kW.

Dla modelowanej zapory pływowej dane zbierane były przy chwilowych prędkościach strumienia równych 2,12 m/s; 2,5 m/s; 3 m/s oraz 3,5 m/s. W charakterystyce zaprezentowanej na rys. 4 można zauważyć, że moc wyjściowa rośnie

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–14. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 4. Charakterystyka mocy wyjściowej w zależności od prędkości strumienia

wykładniczo od 2,12 m/s do szczytu przy 3,5 m/s. Dane zmieniają się zgodnie z półdobowym cyklem pływów. Cykl pływów trwa w określonym przedziale czasowym. Pokazany przedział reprezentuje dwa szczyty pływów o różnej intensywności, które występują co 24 godziny.

5. Podsumowanie i wnioski

Energia pływów jest czystym źródłem energii odnawialnej, jest bardziej przewidywalna w porównaniu z innymi źródłami energii, umożliwia pozyskanie znacznych ilości energii elektrycznej. Rozwój zapór pływowych ograniczają jednak ogromne koszty budowy. Jednak w niedalekiej przyszłości systemy zapór pływowych mogą okazać się kluczowym elementem światowej produkcji energii elektrycznej, ponieważ ceny paliw kopalnych mogą znacznie wzrosnąć. Na świecie rozpoznano pewne potencjalne lokalizacje zapór pływowych do produkcji energii elektrycznej na dużą skalę. Jednak dotychczas zapory pływowe zbudowano jedynie w kilku z wielu potencjalnych lokalizacji. Z budową zapór pływowych związanych jest kilka problemów odnoszących się do zrównoważonego rozwoju. Tymi problemami są: szkodliwe oddziaływanie na żywe organizmy morskie i pogorszenie jakości wody. Mimo to zapory pływowe uważa się za rozwiązanie sprawdzone i niezawodne, które nie wymaga żadnej przełomowej technologii.

Mniejsze niż w przypadku zapór pływowych oddziaływanie na środowisko zaobserwowano przy wykorzystaniu prądów pływowych, jednak nie rozpoznano jeszcze pełnego zakresu szkodliwego oddziaływania środowiskowego. Ponieważ urządzenia do energetycznego wykorzystania prądów pływowych znajdują się wciąż na wczesnym etapie rozwoju, konieczne są dalsze badania i rozwój technologii. Aby produkować duże ilości energii elektrycznej z prądów pływowych, należy skupić się na zagadnieniach przesyłania energii elektrycznej, konserwacji i instalacji oraz warunkach obciążenia.

Bibliografia

1. Hammons T.J., Tidal power [Energia pływów], *Proceedings of the IEEE* 1993, Vol. 81, s. 419–433.
2. Ross R., Tidal Stream Generator [Generator pływowy], Google Patents, 2012.
3. Rourke F.O., Boyle F., Reynolds A., Tidal energy update 2009 [Energia pływów, stan w roku 2009], *Applied Energy* 2010, Vol. 87, s. 398–409.
4. Miller G.R., The flux of tidal energy out of the deep oceans [Przepływ energii pływów z głębi oceanów], *Journal of Geophysical Research* 1966, Vol. 71, s. 2485–2489.
5. Bowley W.W., Underwater power generator [Podwodny generator mocy], Google Patents, 1983.

6. Blanchfield J. i in., Tidal stream power resource assessment for Masset Sound, Haida Gwaii [Ocena zasobów energii pływów w Masset Sound, Jaida Gwaii], *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 2008, Vol. 222, s. 485–492.
7. Salter S., Taylor J.M., Vertical-axis tidal-current generators and the Pentland Firth [Generatory pływowe z osią pionową a Pentland Firth], *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 2007, Vol. 221, s. 181–199.
8. Bryden I., Melville G., Choosing and evaluating sites for tidal current development [Wybór i ocena lokalizacji na budowę elektrowni pływowych], *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 2004, Vol. 218, s. 567–577.
9. Fraenkel P.L., Tidal current energy technologies [Technologie energetyki pływowej], *Ibis* 2006, Vol. 148, s. 145–151.
10. O'Doherty T. i in., An assessment of axial loading on a five-turbine array [Ocena obciążenia osiowego zestawu pięciu turbin], *Proceedings of the ICE-Energy* 2009, Vol. 162, s. 57–65.
11. Batchelor M., Feasibility of offshore wind in Australia [Wykonalność przybrzeżnych elektrowni wiatrowych w Australii], Murdoch University, 2012.
12. Li Y., Calisal S. M., Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine [Trójwymiarowe efekty i ramienne efekty modelowania turbiny pływowej o osi pionowej], *Renewable Energy* 2010, Vol. 35, s. 2325–2334.
13. Zobia A.F., Bansal R.C., Handbook of renewable energy technology [Podręcznik technologii energetyki odnawialnej], World Scientific, 2011.
14. Prandle D., Design of tidal barrage power schemes [Konstrukcja systemów zapór pływowych], *Proceedings of the ICE-Maritime Engineering* 2009, Vol. 162, s. 147–153.
15. Jwo-Hwu Y., Electric power generation at the ebb tide [Generacja energii elektrycznej z odpływów], *Electric Power Systems Research* 1998, Vol. 48, s. 31–35.
16. Hooper T., Austen M., Tidal barrages in the UK: Ecological and social

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–14. When referring to the article please refer to the original text.

PL

- impacts, potential mitigation, and tools to support barrage planning [Zapory pływowe w Wielkiej Brytanii. Oddziaływanie ekologiczne i społeczne, jego potencjalne łagodzenie i narzędzia do planowania zapór pływowych], *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, Vol. 23, s. 289–298.
17. Kjerfve B., Magill K.E., Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons [Geograficzna i hydrodynamiczna charakterystyka płytkich lagun przybrzeżnych], *Marine geology* 1989, Vol. 88, s. 187–199.
 18. Dronkers J., Zimmerman J., Some principles of mixing in tidal lagoons [Pewne zasady mieszania się w lagunach pływowych], *Oceanologica Acta* 1982, Special Issue.
 19. Supino G., The propagation of the tide inside a lagoon [Propagacja pływów w lagunach], *Meccanica* 1970, Vol. 5, s. 42–53.
 20. Gebreslassie M.G., Tabor G.R., Belmont M.R., CFD simulations for investigating the wake states of a new class of tidal turbine [Symulacje CFD w celu badania stanu pobudzenia nowej klasy turbin pływowych], *Journal of Renewable Energy and Power Quality* 2012, Vol. 10.
 21. Parmeggiani S. i in., Power Production and Economical Feasibility of Tideng Tidal Stream Power Converter [Produkcja energii i ekonomiczna wykonalność konwertera energii pływów w Tideng], Department of Civil Engineering, Aalborg University 2010.
 22. Frau J.P., Tidal energy: promising projects: La Rance, a successful industrial-scale experiment [Energia pływów: obiecujące projekty: La Rance, udany eksperyment na skalę przemysłową], *IEEE Transactions on Energy Conversion* 1993, Vol. 8, No. 3, s. 552–558.
 23. Blunden L., Bahaj A., Tidal energy resource assessment for tidal stream generators [Ocena zasobów energii pływów dla celów elektrowni pływowych], Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy* 2007, Vol. 221, s. 137–146.
 24. Neill S.P. i in., The impact of tidal stream turbines on large-scale sediment dynamics [Oddziaływanie turbin pływowych na dynamikę osadów w dużej skali], *Renewable Energy* 2009, Vol. 34, s. 2803–2812.
 25. Masselink G., Short A.D., The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model [Efekt zasięgu pływów na morfodynamikę i morfologię plaż: konceptualny model plaży], *Journal of Coastal Research* 1993, No. 9(3), s. 785–800.
 26. Kashem S.B.A., Sheikh M.I.B., Ahmed J., Tabassum M., Gravity and buoyancy powered clean water pipe generator, IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018, April), s. 1–5.
 27. Chakraborty S., Dzielendziak A., Koroglu T., Yang K., Evaluation of smart eco-friendly public transport options in coastal cities: towards a green future for the city of Southampton, *LRF Collegium 2013 Series*, Vol. 2, University of Southampton 2013.

Saad bin Abul Kashem

dr

Qatar Armed Forces – Academic Bridge Program, Qatar Foundation, Doha, Katar

e-mail: saadaip@gmail.com

Tytuł licencjata inżynierii elektrycznej i elektronicznej uzyskał na East West University w Bangladeszu (2008), a stopień doktora na Swinburne University of Technology (SUT) w australijskim Melbourne (2013). Obecnie pracuje na Wydziale Robotyki i Zaawansowanych Technik Komputerowych w Qatar Armed Forces – Academic Bridge Program, Qatar Foundation w Katarze. Jest także pracownikiem naukowym wizytującym w dziedzinie inżynierii elektrycznej i komputerowej na Texas A&M University AT Qatar w Katarze oraz adiunktem wizytującym na Presidency University w Kalkucie, w Indiach. Jako wykładowca na Wydziale Elektrotechniki (Katedra Robotyki i Mechatroniki) na Swinburne University of Technology w Melbourne, w Australii (1 października 2014 – 27 lipca 2017), był organizatorem, moderatorem i instruktorem różnych kursów. Ma ponad 11-letnie doświadczenie zarówno w przemyśle, jak i środowisku akademickim. Jest członkiem Institution of Engineering and Technology w Wielkiej Brytanii (IET), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), IEEE Robotics and Automation Society oraz International Association of Engineers (IAENG). Jest redaktorem i recenzentem wielu renomowanych czasopism i konferencji krajowych i międzynarodowych. Jego zainteresowania badawcze obejmują dynamikę pojazdów, pojazdy elektryczne, systemy energetyki odnawialnej, sterowanie inteligentne i autonomiczne, robotykę, teorię i zastosowania sterowania nieliniowego.

Molla E. Majid

mgr teleinformatyki

Academic Bridge Program, Qatar Foundation, Doha, Katar

e-mail: mmajid@qf.org.qa

Ma licencjat z nauk technicznych. Ukończyła studia magisterskie w zakresie: Master of Computing Studies na University of Wollongong w Australii i Master of Teaching na University of Western Sydney w Australii. Pracuje nad rozprawą doktorską na Curtin University of Technology w Perth, w Australii. Była wykładowcą systemów zarządzania informacją na uniwersytetach North South University i Independent University w Bangladeszu. Prowadziła szkolenia z teleinformatyki ICT w Departamencie Edukacji w Australii Zachodniej. Obecnie jest zatrudniona jako wykładowca na wydziale zastosowań komputerów w Academic Bridge Program, w Qatar Foundation w Katarze.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–14. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Mujahid Tabassum

mgr teleinformatyki

dplomowany inżynier (IET)

Higher College of Technology, Muscat, Oman

e-mail: mujahid.tabassum@hct.edu.om

Magister inżynierii systemów komputerowych (Szwecja). Ma 10-letnie doświadczenie pedagogiczne. Pracuje w Higher College of Technology, w Muscat IT Department w Omanie.

Azad Ashraf

dr

Katedra Inżynierii Chemicznej i Technologii Procesowej, College of North Atlantic, Katar

Profesor Qatar University, Doha, Katar

e-mail: azad.ashraf@cna-qatar.edu.qa

Ma ponad 18-letnie doświadczenie w badaniach i rozwoju, w przemyśle i środowisku akademickim. Uzyskał tytuł licencjata w dziedzinie inżynierii chemicznej na University of South Alabama w USA oraz tytuł magistra w dziedzinie nauk o środowisku na University of Toronto w Kanadzie. Obecnie pracuje jako wykładowca w College of North Atlantic w Katarze, gdzie wykłada inżynierię procesów chemicznych i przedmiotów związanych z naukami o środowisku, koncentrując się na zrównoważonym rozwoju i energii odnawialnej. Wcześniej pracował nad badaniami audytu energetycznego na McMaster University w Kanadzie, pracował także w różnych branżach oczyszczania ścieków, a także w zakładach przetwarzania odpadów stałych w Kanadzie. Po ukończeniu studiów w USA pracował w Union Carbide, Dow Chemicals i General Electric w USA, gdzie był odpowiedzialny za badania i rozwój w zakresie płynu hydraulicznego i sztywnej piany. Pracował również w Organizacji Narodów Zjednoczonych jako oficer ds. środowiska na Haiti. Jest wykładowcą od 2007 r. na różnych uniwersytetach i uczelniach technicznych w Kanadzie, Bangladeszu, Wielkiej Brytanii i Katarze. Jest członkiem różnych organizacji zrzeszających inżynierów i współautorem 11 artykułów technicznych. Przedstawia referaty na konferencjach w USA dla Society of Tribology and Lubrication Engineering (STLE) i Society of Automotive Engineers (SAE). Jego obecne zainteresowania badawcze obejmują energetykę odnawialną, gospodarkę odpadami, zrównoważony rozwój, inteligentne miasta, a także badania w przemyśle naftowym i gazowym.

Jarosław Guziński

dr hab.

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

e-mail: jaroslaw.guzinski@pg.edu.pl

Uzyskał doktorat nauk technicznych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (WEiA PG). Obecnie jest kierownikiem Katedry Napędów Elektrycznych i Konwersji Energii WEiA PG. W 2012 roku został nagrodzony przez Polską Akademię Nauk – Wydział IV: Nauki Techniczne za monografię „Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi i filtrami wyjściowymi falowników. Zagadnienia wybrane”. Jest autorem i współautorem ponad 160 artykułów w czasopiśmie i na konferencjach. Jego zainteresowania obejmują bezczujnikowe sterowanie maszynami elektrycznymi, napędy wielofazowe (5-fazowe), filtry wyjściowe falowników, odnawialne źródła energii i pojazdy elektryczne. Dr Guziński jest członkiem IEEE (Senior Member).

Krzysztof Łuksza

mgr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

e-mail: krzysztof.luksza@pg.edu.pl

Uzyskał tytuł magistra na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (WEiA PG). Obecnie prowadzi badania w ramach pracy doktorskiej w Katedrze Automatyki Napędów Elektrycznych i Konwersji Energii WEiA PG. Tematyka jego badań obejmuje m.in. bezczujnikowe sterowanie maszynami elektrycznymi, obserwatory stanu, napędy wielofazowe (5-fazowe) i pojazdy elektryczne.