

УДК 620.92

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_17

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

А.М. Олейников

Институт природно-технических систем
Севастополь, Россия
e-mail: oma091041@gmail.com

Л.Н. Канов

Севастопольский государственный университет
Севастополь, Россия
e-mail: lnkanov48@mail.ru

Рассмотрены физические взаимодействия и математическая модель волновой электростанции, содержащей ряд гидроустановок с однотипными генераторами с возбуждением от постоянных магнитов, а в качестве резервного источника использована аккумуляторная батарея, при этом все источники работают на общую шину постоянного тока с подсоединенной к ней нагрузкой, которая, в свою очередь, включает параллельно соединенные полезную переменную и балластную нагрузку для сброса излишков мощности. Математическая модель волновой установки включает уравнения для вертикальной гидротурбины барабанного типа с анализом действующих на лопасть составляющих сил и моментов, а также соотношения для оценки динамических параметров волны. Синхронные генераторы описаны уравнениями Парка-Горева во вращающихся ортогональных координатах, при этом не учитываются действия демпфирующих контуров и насыщение магнитной цепи. Упрощенная модель АБ представляет последовательное соединение внутреннего сопротивления и источника напряжения, а уравнения механического равновесия установки в целом учитывают вращающий момент гидротурбины и тормозные электромагнитные моменты генераторов ВЭУ. Результаты моделирования, реализованного в среде *MathCad*, построены на совместной работе нескольких таких установок, работающих в различных условиях волнения водной поверхности, и показывают, что модель в целом вполне адекватно отражает физические взаимодействия основных элементов при изменении основных параметров волнения, а их снижение до определенного уровня приводит к заметному снижению эффективности преобразования энергии. В то же время результаты моделирования показывают возможность и целесообразность конструирования и построения подобных волновых электростанций и эксплуатации их в реальных условиях волнения водной среды.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, возбуждение, волновая установка, волновая электростанция, математическое моделирование, постоянные магниты, синхронные генераторы, уравнения равновесия.

Для цитирования: Олейников А.М., Канов Л.Н. Математическое моделирование режимов работы волновой электростанции // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 17-35. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_17

MATHEMATICAL MODELING OF WAVE POWER PLANT OPERATING MODES

A.M. Oleynikov

Institute of Natural and Technical Systems
Sevastopol, Russia
e-mail: oma091041@gmail.com

L.N. Kanov

Sevastopol State University
Sevastopol, Russia
e-mail: lkanov@mail.ru

Abstract. Physical interactions and a mathematical model of a wave power plant containing a number of hydraulic installations with the same type of generators with excitation from permanent magnets are considered, and a battery is used as a backup source, while all sources work on a common DC bus with a load connected to it, which, in turn, includes parallel connected payload variable and ballast load to reset excess power. The mathematical model of the wave setting includes equations for a vertical drum-type hydraulic turbine with an analysis of the forces and moments acting on the blade, as well as relations for estimating the dynamic parameters of the wave. Synchronous generators are described by the Park-Gorev equations in rotating orthogonal coordinates, while not taking into account the actions of damping circuits and the saturation of the magnetic circuit. The simplified AB model represents a serial connection of the internal resistance and the voltage source, and the mechanical equilibrium equations of the installation generally take into account the torque of the hydraulic turbine and the braking electromagnetic moments of the wind turbine generators. The results of the simulation implemented in the MathCad environment are based on the joint work of several such installations operating in different conditions of water surface waves and show that the model as a whole adequately reflects the physical interactions of the main elements when changing the main parameters of the wave, and their reduction to a certain level leads to a noticeable decrease in the efficiency of energy conversion. At the same time, the simulation results show the possibility and feasibility of designing and building such wave power plants and operating them in real conditions of water disturbance.

Keywords: battery, equilibrium equations, excitation, mathematical modeling, permanent magnets, synchronous generators, wave power plant, wave setting.

For citation: A.M. Oleynikov and L.N. Kanov, "Mathematical modeling of wave power plant operating modes", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 17-35, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_17

1. Введение

Проблеме практической реализации волновой энергетики, потенциал которой обусловлен глобальными планетарно-космическими взаимодействиями и, по сути, неисчерпаем, посвящено множество работ [1-6]. При этом сохраняется актуальность математического описания всевозможных схем такого преобразования, моделирования физических процессов в различных режимах работы.

В данном случае рассматривается прибрежная волновая электростанция для электроснабжения локальной нагрузки, которая содержит сеть волновых генераторных электроустановок (ВЭУ) и аккумуляторную батарею (АБ), работающие на общую шину постоянного напряжения с присоединенной к ней нагрузкой, при этом АБ задает на шине опорное напряжение U . В нагрузку входит полезная динамическая переменная нагрузка $R_n(t)$ и некая балластная нагрузка $R_b(t)$ для возможности сброса излишков мощности. Общая подключенная нагрузка имеет вид [7]:

$$R(t) = \frac{R_n(t) \cdot R_b(t)}{R_n(t) + R_b(t)}. \quad (1)$$

Генераторы волновых электроустановок подключены к общей шине постоянного напряжения через выпрямители (рис. 1).

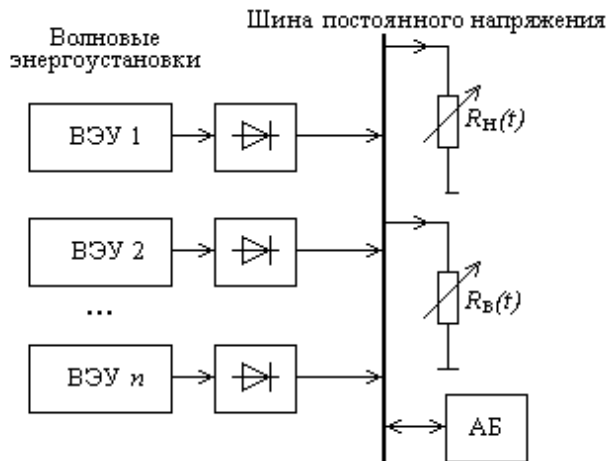


Рис. 1. Упрощенная блок-схема волновой электростанции, работающей на шину постоянного тока

Fig. 1. Simplified block diagram of a wave power plant operating on a DC bus

Целью работы является математическое описание и анализ режимов работы волновой электростанции в условиях резко переменного волнения моря и соответствующего изменения динамической и балластной нагрузок.

II. Математическое описание режима волновой электроэнергетической установки

Волновая генераторная электроэнергетическая установка преобразует энергию волнового прибоя в электроэнергию с заданными параметрами, в данном случае она представлена электрогенератором с вертикальной турбиной барабанного типа 1 (рис. 2) [8], которая устанавливается на бетонном основании 9 в воде. Рабочее колесо гидротурбины содержит четыре лопасти, установленные на вертикальном валу с взаимно противоположной выпуклостью. Лопасти выполнены из листового материала в виде полуцилиндров с радиусом R , прикрепленных к центральному валу 2, к которому через редуктор присоединен электрический генератор 11.

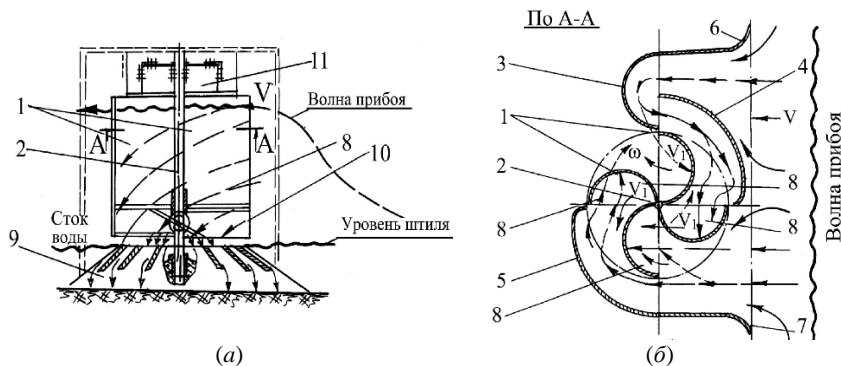


Рис. 2. Волновая электроэнергетическая установка: продольный разрез (а); поперечное сечение по А-А (б)

Fig. 2. Wave electric power plant: longitudinal section (a); cross-section along A-A (b)

Обозначения на рис. 2: 1 – гидротурбина; 2 – вал; 3 – 7 – направляющие пластины; 8 – направление потока; 9 – основание; 10 – корпус; 11 – генератор; V – скорость воды.

На основании с внешней стороны турбины установлены направляющие пластины (НП) 3 – 7. НП5 выполнена в виде полуцилиндра, обращенного вогнутой частью к текущей воде. НП4 представляет собой криволинейный экран, охватывающий рабочее колесо на четвертую часть окружности. Одним своим концом НП4 расположена внутри НП3 в ее средней части,

а вторым – на входе фронта воды в колесо. Выпуклой частью НП4 ориентирована к текущей воде. НП5 имеет такую же форму, как и НП4, но расположена на противоположной стороне платформы.

Текущая вода волны прибора с помощью НП направляется на лопасти. Суммарное воздействие воды на лопасти, как в типичной гидротурбине, создает относительно вертикальной оси момент вращения генератора. Получим уравнение этого момента на примере расположения турбины, показанного на рис. 3.

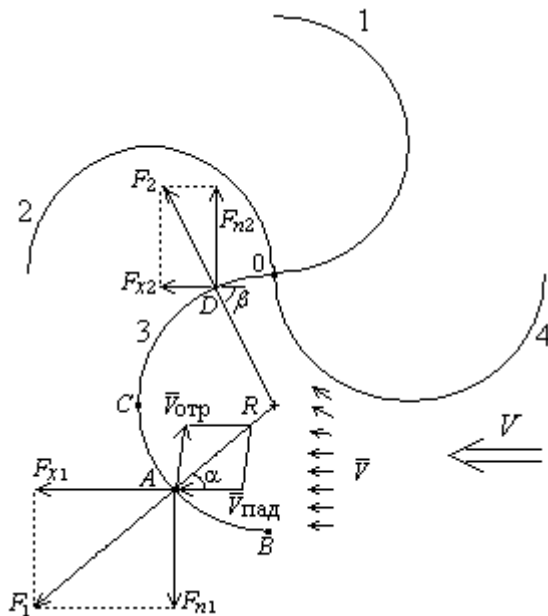


Рис. 3. Силы, действующие на лопасть колеса гидротурбины
Fig. 3. Forces acting on the blade of the wheel of the hydraulic turbine

Частицы воды со скоростью v попадают на элемент A площадки с размерами $dl \times dy$ поверхности лопасти 3 на высоте y от основания, где dl – длина элемента площадки по окружности лопасти; dy – высота элемента площадки. Скорость v частиц воды в точке установки турбины зависит от глубины погружения лопасти в воду y и от времени. Угол падения струи воды относительно радиуса лопасти обозначим α . Отражение происходит под тем же углом. Масса падающей и отраженной воды в единицу времени определяется произведением $\rho \cdot dl \cdot dy \cdot v$, где ρ – плотность воды. Удельная

сила, действующая на элемент площадки, определяется как изменение количества движения струи воды после отражения от лопасти [9]. Часть этой силы, связанная с изменением направления скорости после отражения в точке A на участке BC , определяется как:

$$F = \rho \cdot |v| \cdot dl \cdot dy \cdot (\bar{v}_{\text{над}} - \bar{v}_{\text{отр}}). \quad (2)$$

Учитывая, что $dl = R \cdot d\alpha$, из рис. 3 получаем:

$$F_1 = \rho \cdot v^2 \cdot R \cdot d\alpha \cdot dy \cdot 2 \cos \alpha. \quad (3)$$

Проекция этой силы на горизонтальную ось x направления течения воды записывается в виде:

$$F_{x1} = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot (\cos \alpha)^2 \cdot d\alpha \cdot dy, \quad (4)$$

а ее проекция на вертикальную ось в виде:

$$F_{n1} = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \cdot dy \cdot \sin \alpha. \quad (5)$$

Полагаем далее, что вследствие искривления течения струи воды на участке CO вода попадает перпендикулярно на поверхность лопасти (по направлению радиуса), тогда сила в любой точке на этом участке равна:

$$F_2 = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot d\beta \cdot dy, \quad (6)$$

при этом проекция такой силы на горизонтальную ось x приобретает вид:

$$F_{x2} = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot \cos \beta \cdot d\beta \cdot dy, \quad (7)$$

а на вертикальную ось:

$$F_{n2} = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot dy. \quad (8)$$

Удельные вращающие моменты относительно оси турбины, действующие на лопасть от сил F_{x1} , F_{x2} , F_{n1} , F_{n2} , составляют:

– в произвольной точке A на участке BC :

$$M_{x1} = F_{x1} \cdot (R + R \sin \alpha) = 2\rho \cdot v^2 \cdot R^2 \cdot (\cos \alpha)^2 \cdot (1 + \sin \alpha) \cdot d\alpha \cdot dy; \quad (9)$$

$$M_{n1} = -F_{n1} \cdot R \cos \alpha = -2\rho \cdot v^2 \cdot R^2 \cdot (\cos \alpha)^2 \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \cdot dy; \quad (10)$$

– в точках на участке CO (на примере точки D) они равны:

$$M_{x2} = F_{x2} \cdot (R - R \sin \beta) = 2\rho \cdot v^2 \cdot R^2 \cdot \cos \beta \cdot (1 - \sin \beta) \cdot d\beta \cdot dy; \quad (11)$$

$$M_{n2} = F_{n2} \cdot R \cos \beta = 2\rho \cdot v^2 \cdot R^2 \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot dy. \quad (12)$$

Удельные вращающие моменты, действующие по всей длине окружности лопасти на высоте y , равны:

$$M_1 = 2\rho R^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 v^2 \cdot (\cos \alpha)^2 \cdot dy \cdot d\alpha = \rho R^2 v^2 \frac{\pi}{2} dy; \quad (13)$$

$$M_2 = 2\rho R^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} v^2 \cdot \cos \alpha \cdot dy \cdot d\alpha = 2\rho R^2 v^2 dy. \quad (14)$$

Другая часть удельной силы, действующей на элемент поверхности лопасти, зависит от изменения модуля скорости воды, т.е. от ускорения $a = dv / dt$ [10], которое также зависит от глубины y и от времени:

$$F_a = \rho \cdot a \cdot dl \cdot dy = \rho \cdot a \cdot R \cdot d\alpha \cdot dy. \quad (15)$$

Удельный вращающий момент, действующий на лопасть от силы F_a , составляет:

$$M_a = \rho R \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} a \cdot dy \cdot d\alpha = \rho \cdot R \cdot a \cdot \pi \cdot dy. \quad (16)$$

Таким образом суммарный вращающий момент, действующий на три лопасти турбины, представляется уравнением:

$$\begin{aligned}
 M(t) &= 3 \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \left[\rho R^2 v^2 \frac{\pi}{2} + 2\rho R^2 v^2 + \rho R a \pi \right] dy = \\
 &= 3\rho R \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \left[Rv(t, y)^2 \left(\frac{\pi}{2} + 2 \right) + a(t, y)\pi \right] dy
 \end{aligned} \tag{17}$$

III. Оценка параметров динамики волны

Оценим далее глубину погружения лопасти в воду при волнении, а также величины скорости $v(t, y)$ и ускорения частиц воды $a(t, y)$. Глубина погружения лопасти в воду определяется рельефом волны, который рассчитывается по принятой высоте волны H , длине волны λ и глубине воды h (рис. 4).

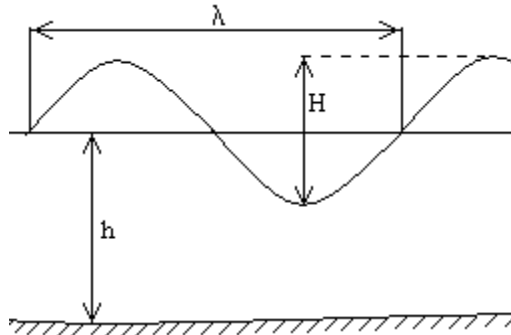


Рис. 4. Основные параметры волны
Fig. 4. Basic parameters of the wave

По времени волна имеет период T и волновое число $k = 2\pi / \lambda$, а ее профиль согласно [4] представляется в виде:

$$\eta(x, t) = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 F_n \cdot \cos n(kx - \omega t), \tag{18}$$

где $\omega = 2\pi / T$ – частота.

Амплитуды слагаемых определяются соотношениями:

$$F_1 = b; F_2 = b^2 \cdot (F_{22} + b^2 F_{24}); F_3 = b^3 \cdot (F_{33} + b^2 F_{35}); F_4 = b^4 F_{44}; F_5 = b^4 F_{55}. \tag{19}$$

Кроме того, имеет место уравнение:

$$kH = 2(b + b^3 F_{33} + b^5 (F_{35} + F_{55})), \quad (20)$$

из которого определяется коэффициент b . Коэффициенты F_{ij} находим в зависимости от отношения h/λ из табл. 3.5 [10].

Далее с целью предметных численных расчетов полагаем следующие типичные параметры волнения в прибрежной зоне: $h = 2,5$ м; $H = 3$ м; $\lambda = 12,5$ м; $\omega = 2,63$ с⁻¹. Тогда $h/\lambda = 0,2$; $k = 0,503$; $kH/2 = 0,754$; $b = 0,488$. Из табл. 3.5 [10] получаем:

$$F_{33} = 0,996; F_{35} = 3,679; F_{55} = 1,734; F_{22} = 0,927; F_{24} = 1,938; F_{44} = 1,259,$$

и

$$F_1 = 0,488; F_2 = 0,30; F_3 = 0,218; F_4 = 0,071; F_5 = 0,048.$$

Профиль волны имеет вид (в точке расположения волновой установки полагаем $x = 0$):

$$\eta(t) = 1,992 \left(0,488 \cos 2,63t + 0,30 \cos 5,26t + 0,218 \cos 7,89t + \dots \right. \\ \left. \dots + 0,071 \cos 10,52t + 0,048 \cos 13,15t \right). \quad (21)$$

График профиля волны представлен на рис. 5.

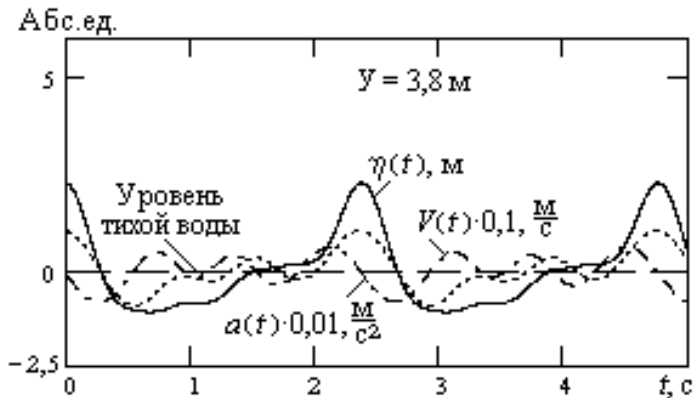


Рис. 5. Параметры динамики волны на высоте 3,8 м от поверхности
Fig. 5. Parameters of wave dynamics at a height of 3.8 m from the surface

Оценим скорость $v(t, y)$ движения частиц воды в волне. Горизонтальная составляющая скорости, обуславливающая вращающий момент, определяется из выражения [10]:

$$v_x(y, t) = \frac{\omega}{k} \cdot \sum_{n=1}^5 G_n \cdot \frac{\operatorname{ch}(nky)}{\operatorname{sh}(nkh)} \cdot \cos n(kx - \omega t), \quad (22)$$

где $G_1 = bG_{11} + b^3G_{13} + b^5G_{15}$; $G_2 = 2(b^2G_{22} + b^4G_{24})$; $G_3 = 3(b^3G_{33} + b^5G_{35})$;

$$G_4 = 4b^4G_{44}; G_5 = 5b^5G_{55}.$$

Коэффициенты G_{ij} находим из табл. 3.6 [10], для принятой величины $h/\lambda = 0,2$, получаем значения: $G_{11} = 1$; $G_{13} = -1,263$; $G_{15} = -2,266$; $G_{22} = 0,326$; $G_{24} = 0,688$; $G_{33} = -0,017$; $G_{35} = 1,093$; $G_{44} = -0,044$; $G_{55} = 0,006$.

Отсюда находятся коэффициенты $G_1 = 0,278$; $G_2 = 0,231$; $G_3 = 0,085$; $G_4 = -0,01$; $G_5 = 0,00083$. Характер изменения горизонтальной составляющей скорости волны показан на рис. 5 (для наглядности масштаб кривой уменьшен в 10 раз).

Скорость распространения волны c находим по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} (1 + b^2C_1 + b^4C_2) \operatorname{th}(kh)}, \quad (23)$$

где коэффициенты $C_1 = 1,549$; $C_2 = 5,044$ находятся из табл. 3.7 [4] для $h/\lambda = 0,2$. Тогда горизонтальная составляющая ускорения определяется выражением:

$$a = \frac{kc^2}{2} \cdot \sum_{n=1}^5 R_n \sin n(kx - \omega t), \quad (24)$$

а коэффициенты R_n подсчитываются по формулам:

$$R_1 = 2U_1 - U_1U_2 - U_2U_3 - V_1V_2 - V_2V_3; \quad (25)$$

$$R_2 = 4U_2 - U_1^2 + V_1^2 - 2U_1U_3 - 2V_1V_3; \quad (26)$$

$$R_3 = 6U_3 - 3U_1U_2 + 3V_1V_2 - 3U_1U_4 - 3V_1V_4; \quad (27)$$

$$R_4 = 8U_4 - 2U_2^2 + 2V_2^2 - 4U_1U_3 + 4V_1V_3; \quad (28)$$

$$R_5 = 10U_5 - 5U_1U_4 - 5U_2U_3 + 5V_1V_4 + 5V_2V_3. \quad (29)$$

В этих соотношениях для упрощения обозначены:

$$U_n = G_n \cdot \frac{\text{ch}(nky)}{\text{sh}(nkh)}; V_n = G_n \cdot \frac{\text{sh}(nky)}{\text{sh}(nkh)}. \quad (30)$$

Кривые горизонтальной составляющей ускорения частиц воды $a(t)$ показаны на рис. 5, а вращающего момента $M(t)$ при принятых ранее параметрах волнения – на рис. 6. При расчетах полагаем $y_{\min} = h$; $y_{\max} = \max(\eta(t) + h, h_{\min})$.

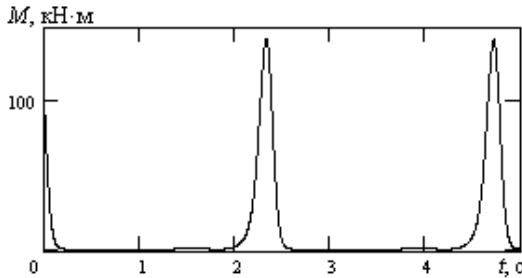


Рис. 6. Зависимость вращающего момента турбины от времени
Fig. 6. Dependence of turbine torque on time

Воздействующий на турбину вращающий момент имеет импульсный характер, при этом его максимум приходится на время прохождения гребня волны, а профиль волны ниже уровня тихой воды в формировании момента не участвует, так как нижняя граница вертикально расположенных лопастей находится на уровне тихой воды.

IV. Упрощенная схемная модель волновой электростанции

В настоящее время имеется несколько типов генераторов, пригодных для применения на волновых электроустановках: генераторы постоянного тока; синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением [13]; асинхронные генераторы [14], синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) [15]. Последние имеют ряд важных преимуществ при использовании их в условиях открытого моря – высокая надежность, простота конструкции и обслуживания, связанная с отсутствием скользящих контактов; автономность, так как не требуется постоянный ток возбуждения; более высокий КПД и меньший нагрев из-за отсутствия потерь на возбуждение. Поэтому расчет режима выполним с применением генератора на постоянных магнитах мощностью 30 кВт; с напряжением фазы 127 В и с номинальной скоростью вращения $n = 75$ об/мин, который вполне может быть применен в установке такого типа

Так как собственная динамика СГПМ по сравнению с инерционностью волновой турбины мала, для описания СГПМ применим алгебраические уравнения во вращающихся ортогональных dq -координатах с опережающим вращением поперечной оси:

$$\left. \begin{aligned} u_d + R_c i_d - L_q i_q \Omega_0 p &= 0 \\ u_q + R_c i_q + L_d i_d \Omega_0 p + M_{md} I_M \Omega_0 p &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (31)$$

В этих уравнениях u_d, u_q, i_d, i_q – продольные и поперечные составляющие напряжений и токов обмоток статора генератора; L_d, L_q – индуктивности обмотки статора вдоль продольной и поперечной оси; $M_{md} I_M$ – потокосцепление постоянных магнитов; p – число пар полюсов; Ω_0 – угловая скорость вращения ротора генератора. Далее полагаем $u_d = 0$.

Последнее слагаемое во втором уравнении (31) представляет ЭДС генератора $E = M_{md} \cdot I_M \cdot \Omega_0 \cdot p$, где $\Omega_0 p = k_{ред} \cdot \Omega \cdot p$ – частота напряжения генератора; $k_{ред}$ – коэффициент передачи редуктора. Из (31) следует, что если при малой скорости вращения генератора ЭДС по абсолютной величине будет меньше напряжения на шине: $|E / k_e| < U$, диоды выпрямителя будут закрыты, и ток генератора равен нулю. Если $|E / k_e| > U$, то составляющие тока генератора по (31) определяются следующим образом:

$$i_d = \frac{\left| \frac{E}{k_e} \right| - U}{R_c^2 + L_d L_q (\Omega_0 p)^2} L_q \Omega_0 p; \quad (32)$$

$$i_q = \frac{\left| \frac{E}{k_e} \right| - U}{R_c^2 + L_d L_q (\Omega_0 p)^2} \cdot R_c, \quad (33)$$

и ток, поступающий на шины постоянного напряжения, определяется по соотношению:

– при $|E / k_e| < U$ получаем $i = 0$, иначе

$$i = \frac{\left| \frac{E}{k_e} \right| - U}{R_c^2 + L_d L_q (\Omega_0 p)^2} \cdot \sqrt{R_c^2 + (L_q \Omega_0 p)^2}. \quad (33a)$$

В этих формулах R_c представляет сумму сопротивления фазы обмотки статора и сопротивления арматуры шины постоянного напряжения;

k_e – коэффициент, учитывающий влияние трехфазного двухполупериодного выпрямителя $k_e = 0,43$ [13].

Электромагнитный момент генератора оценим в номинальном режиме из выражения $P = M_{ЭМ} \cdot \Omega_{0н}$, откуда $M_{ЭМ} = 3822$ Н·м. Здесь $\Omega_{0н} = (n_{ном} \cdot 2\pi) / 60 = 7,85$ с⁻¹. Для момента на валу гидротурбины получаем $M_{ЭМ} \cdot k_{ред} = 44,7$ кН·м. Полагаем, что скорость вращения турбины соответствует номинальной скорости генератора $\Omega_{ном} = \Omega_{0н} / k_{ред} = 0,66$ с⁻¹ при $k_{ред} = 11,7$. Находим удельный момент сопротивления на валу турбины от генератора $k_G = M_{ЭМ} \cdot k_{ред} / \Omega_{ном} = 67,8$ кН·м·с. Далее, согласно [8], полагаем $R_C = 0,4$ Ом; $L_d = 6$ мГн; $L_q = 5,9$ мГн; $M_{md} \cdot I_M = 0,475$ Вб.

Упрощенная модель аккумуляторной батареи в рабочем режиме разряда-заряда представляет последовательное соединение внутреннего сопротивления r_{AB} и источника напряжения U_{AB} , пропорционального текущему значению накопленного заряда Q : $U_{AB} = k_{AB} \cdot Q$, рис. 7, а [11, 12]. Ток, протекающий через батарею, характеризует скорость изменения ее заряда:

$$i_{AB} = \frac{dQ}{dt}. \quad (34)$$

Общая упрощенная схемная модель волновой электростанции принимает вид, изображенный на рис. 7, б. Здесь $J_{\Sigma}(t)$ – источник тока, равный суммарному току, подаваемому на шины постоянного напряжения от волновых установок через выпрямители:

$$J_{\Sigma}(t) = \sqrt{I_{d1}^2 + I_{q1}^2} + \sqrt{I_{d2}^2 + I_{q2}^2} + \dots + \sqrt{I_{dn}^2 + I_{qn}^2}. \quad (35)$$

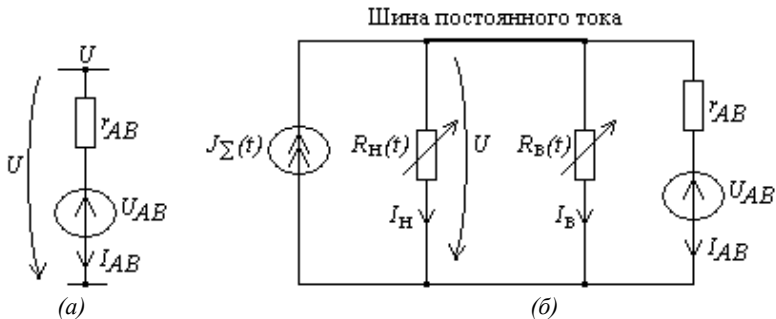


Рис. 7. Упрощенная электрическая схема волновой электростанции: схема замещения аккумуляторной батареи (а); упрощенная схема электростанции (б)

Fig. 7. Simplified electrical circuit of wave power plant: battery replacement scheme (a); simplified scheme of the power plant (b)

Из схемы понятно, что напряжение на шине постоянного тока с учетом (4) имеет вид:

$$U = \frac{R(t)}{r_{AB} + R(t)} \cdot (k_{AB}Q + r_{AB}J_{\Sigma}); \quad (36)$$

а ток аккумуляторной батареи определяется выражением $i_{AB} = (U - k_{AB}Q) / r_{AB}$. С учетом (3), (5) получаем уравнение для значения текущего заряда Q аккумуляторной батареи:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{U - k_{AB}Q}{r_{AB}}. \quad (37)$$

Для скорости вращательного движения турбины под действием изменяющегося момента $M(t)$ получаем:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{\Omega}\Omega + k_G\Omega = M(t), \quad (38)$$

где J – момент инерции турбины относительно оси вращения с учетом приведенного момента инерции ротора генератора; k_{Ω} – коэффициент, характеризующий момент сопротивления в зависимости от скорости вращения; $k_G\Omega$ – момент сопротивления генератора, пропорциональный скорости вращения.

Для поддержания напряжения U на шине на заданном уровне U_{zad} применяется регулирование балластного сопротивления R_B , подсоединенного параллельно сопротивлению нагрузки $R_H(t)$. Его величина уменьшается при увеличении напряжения U на шине и увеличивается в противном случае. Поэтому к вышеперечисленным (6), (7) добавляется уравнение:

$$\frac{dR_B}{dt} = -k_B(U - U_{zad}), \quad (39)$$

где U_{zad} – заданный уровень напряжения на шине постоянного тока.

Численное решение (6), (7) выполнено в среде *MathCad* при следующих принятых значениях: $J = 1,35 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $k_{\Omega} = 2,32 \cdot 10^4$. Электромагнитный момент сопротивления генератора $k_G\Omega$ определяется произведением вырабатываемой мощности и скорости.

У. Расчет режима волновой электрической установки

На рис. 8 представлены полученные в результате моделирования графики ЭДС генератора, тока, мощности и энергии, передаваемых на шины постоянного напряжения.

График скорости вращения турбины для наглядности показан увеличенным в 100 раз. Как видно из рисунка, ток и мощность имеют периодический характер, при этом амплитуда тока достигает 400 А, мощности 75 кВт. В течение половины наблюдаемого времени (ниже горизонтальной пунктирной линии напряжения U) электроэнергия от генератора не поступает, так как из-за снижения скорости вращения турбины в промежутках между гребнями волн ЭДС невелика и меньше напряжения U на шинах.

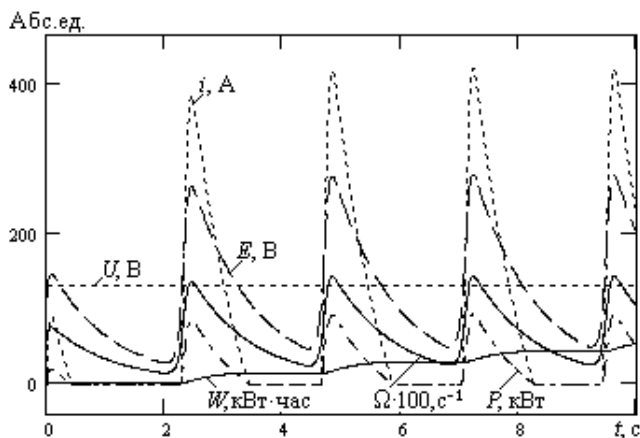


Рис. 8. Режим работы единичной волновой установки

Fig. 8. Mode of operation of a wave installation unit

Наиболее простым и одновременно эффективным способом преодоления этого обстоятельства является установка нескольких подобных волновых установок в различных точках акватории моря с устойчиво максимальными волновыми параметрами, так как мгновенная скорость волн и соответствующая скорость вращения турбин с большой вероятностью в этих точках будет различной. На рис. 9 – 10 как раз и показаны результаты моделирования работы мультиволновой электростанции, состоящей из семи установок, каждая из которых размещена в несколько отличающихся условиях волнения. В частности, кривые суммарного тока, мощности и электроэнергии, поступающих с ВЭУ на шину постоянного напряжения (рис. 9), показывают, что и ток, и мощность поступают практически непрерывно, а

их изменение определенно соответствует изменениям скорости ветра и волновой обстановки в акватории; с уменьшением скорости ветра мощность и ток ВЭУ уменьшаются, а в среднем за минуту на шины передается около полутора тысяч киловатт-часов электроэнергии.

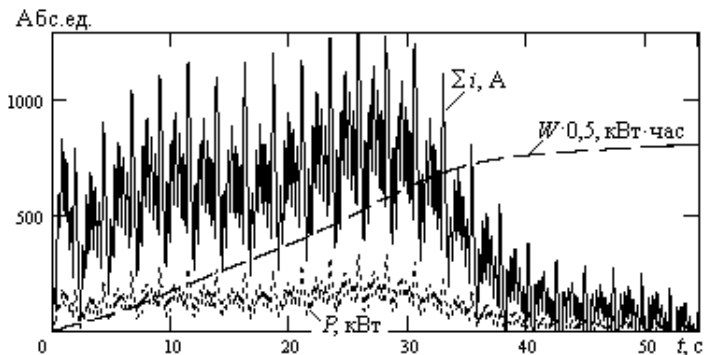


Рис. 9. Ток, мощность и энергия, поступающие с ВЭУ на шину постоянного напряжения

Fig. 9. Current, power and energy coming from wind power supply to DC bus

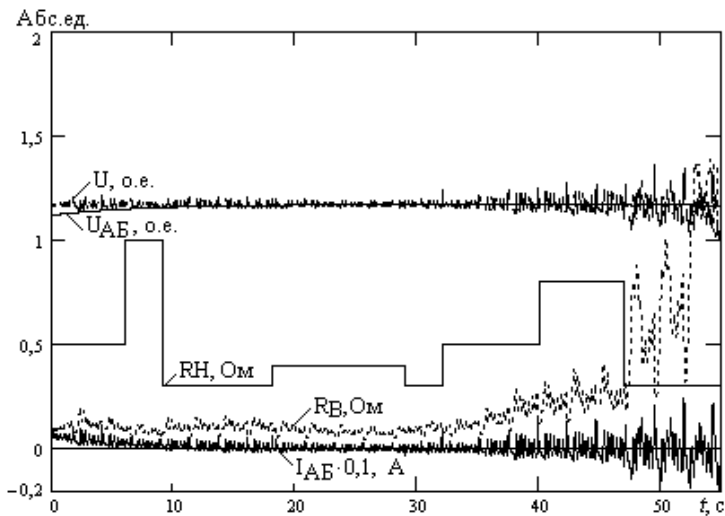


Рис. 10. Режим работы аккумулятора и балластного сопротивления

Fig. 10. Battery operation and ballast resistance mode

На рис. 10 демонстрируется случайный характер изменения сопротивления нагрузки, а также график изменения балластного сопротивления, которое в определенной мере стабилизирует напряжение на шине. Колебания этого напряжения отражают случайный характер воздействующих на турбины ВЭУ волн. При достаточном уровне волнения эти колебания незначительны; при снижении скорости ветра и снижении волнения эффективность стабилизации снижается. Ток аккумулятора испытывает увеличивающиеся колебания, что отражает интенсивный процесс заряда-разряда. Таким образом, при снижении скорости ветра и волновой нагрузки эксплуатация электростанции становится менее целесообразной.

VI. Выводы

На основе известных уравнений гидродинамики вертикальной гидротурбины, параметров волнового процесса и уравнений электрического и механического равновесия электрической части комплекса вполне возможно построить систему математического моделирования волновой электроэнергетической установки, вполне адекватно отражающую достаточно сложные процессы преобразования волновой энергии водной среды в электрическую.

Наиболее предпочтительным представляется использование в таких установках тихоходных синхронных генераторов на постоянных магнитах, не требующих систем возбуждения и отличающихся рядом важных преимуществ перед другими преобразователями при использовании в условиях открытого моря: высокой надежностью, простотой конструкции и обслуживания, автономностью и более высоким КПД.

Единичная волновая установка генерирует электроэнергию низкого качества, что объясняется предельно нестационарным, случайным характером морского волнения, а для повышения качества электроэнергии обосновано применение нескольких волновых установок в составе волновой электростанции.

© Олейников А.М., 2021

© Канов Л.Н., 2021

Поступила в редакцию 19.11.2021

Received 19.11.2021

Библиографический список

- [1] Гуц Ю.В. Волновая энергетика – перспективный сектор возобновляемых источников энергии // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 2 (41). С. 30-44.
- [2] Князев В. Есть ли будущее у волновых электростанций? // Greenologia.ru. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://greenologia.ru/ekozhizn/tehnologii/volnovyye-eklektrostancij.html> (дата обращения 20.08.2021).

- [3] Чебоксаров В.В. К вопросу о создании маятниковых волновых энергоустановок большой мощности // Энергетические установки и технологии. 2016. Т. 2. № 4. С. 69-76.
- [4] Чебоксаров В.В., Кочетов И.А. Выбор оборудования плавучих волновых энергоустановок // Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 2. С. 58-63.
- [5] Nell S.P., Hashemi M.R. Fundamentals of ocean renewable energy. Generating electricity from the sea. Academic Press, 2018. – 336 p.
- [6] McDonald A., Carroll J. Offshore wind farms. Technologies, design and operation. Woodhead Publishing, 2016. – P. 419-440.
- [7] Олейников А.М., Канов Л.Н. Исследование режимов работы многомашинной ветроустановки с механической редукцией // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2019. № 10-12 (294-296). С. 12-22. DOI: 10.15518/isjaee.2019.10-12.012-022
- [8] Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика. Харьков: ХАИ; Севастополь: СевНТУ, 2006. – 625 с.
- [9] Алферьев М.Я. Гидромеханика. М.: Речной транспорт, 1961. – 327 с.
- [10] Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. Л.: Судостроение, 1986. – 288 с.
- [11] Сафонов В.А., Кузнецов П.Н., Кувшинов В.В. Специальные вопросы возобновляемой энергетики. Севастополь: Колорит, 2017. – 358 с.
- [12] Лейкин В.С. Судовые электрические станции и сети. М.: Транспорт, 1966. – 334 с.
- [13] Трещев И.И. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.: Энергия, 1980. – 342 с.
- [14] Веретенников Л.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах кораблей. Л.: Изд-во Военно-морской академии им. Гречко А.А., 1965. – 493 с.
- [15] Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

References

- [1] Yu.V. Gushch, “Wave energy – a promising renewable energy sector”, *Construction of Unique Buildings and Structures*, no. 2 (41), pp. 30-44, 2016.
- [2] V. Knyazev, “Estj li buduschee u vojnovykh elektrostancij? [Is there a future for wave power plants?]”, *Greenologia.ru*, 2015. [Online]. Available at: <http://greenologia.ru/ekozhizn/tehnologii/volnovye-elektrostancij.html> (Accessed: Aug. 20, 2021) (in Russian).
- [3] V.V. Cheboxarov, “On development of high capacity pendulum-type wave energy converters”, *Power Plants and Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 69-76, 2016.
- [4] V.V. Cheboxarov and I.A. Kochetkov, “Selection of equipment of floating wave power plants”, *Power Plants and Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 58-63, 2020.
- [5] S.P. Nell and M.R. Hashemi, *Fundamentals of ocean renewable energy. Generating electricity from the sea*. Academic Press, 2018.
- [6] A. McDonald and J. Carroll, *Offshore wind farms. Technologies, design and operation*. Woodhead Publishing, 2016, pp. 419-440.

- [7] A.M. Oleynikov and L.N. Kanov, "Study on the modes of operation of a multi-machine installations with mechanical reduction", *Alternative Energy and Ecology (IS-JAEE)*, no. 10-12, pp. 12-22, 2019. DOI: 10.15518/isjaee.2019.10-12.012-022
- [8] V.S. Krivtsov, A.M. Oleynikov and A.I. Yakovlev, *Neischerpaemaya energiya. Kn. 3. Alternativnaya energetika [Inexhaustible energy. Book 3. Alternative Energy]*. Kharkov: NAU "KhAI"; Sevastopol: SevNTU, 2006 (in Russian).
- [9] M.Y. Alferyev, *Gidromekhanika [Hydromechanics]*. Moscow: Rechnoy transport, 1961 (in Russian).
- [10] T. Dawson, *Proektirovanie sooruzheniy morskogo shel'fa [Designing of offshore structures]*. Leningrad: Sudostroenie, 1986 (in Russian).
- [11] V.A. Safonov, P.N. Kuznetsov and V.V. Kuvshinov, *Spezialnie voprosy vobnovlyayemy energetiki [Special issues of renewable energy]*. Sevastopol: Col-орite, 2017 (in Russian).
- [12] V.S. Leykin, *Sudovie elektricheskie stantzii i set [Ship electric power stations and networks]*. Moscow: Transport, 1966 (in Russian).
- [13] I.I. Treshchev, *Perekhodnye processy v elektricheskikh mashinah peremennogo toka [Transient processes in electrical machines of alternating current]*. Moscow: Energiya, 1980 (in Russian).
- [14] L.P. Veretennikov, *Perekhodnye processy v elektroenergeticheskikh sistemah korablej [Transitional processes in the electric power systems of ships]*. Leningrad: The Naval Academy n.a. A.A. Grecko, 1965 (in Russian).
- [15] V.A. Balagurov and F.F. Galtiev, *Elektricheskie generator s postoyannimi magnitami [Electric generators with permanent magnets]*. Moscow: Energoatomizdat, 1988 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олейников Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института природно-технических систем, г. Севастополь, Российская Федерация.

Alexander M. Oleynikov, D. Sci. (Eng.), professor, chief researcher of the Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russian Federation.

Канов Лев Николаевич, кандидат технических наук, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Lev N. Kanov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.