

---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

УДК 621.3

**А.И. Байков, А.Б. Дарьенков, А.А. Куркин, Е.Н. Соснина**

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ  
ПРИЛИВНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ  
С ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМИ ДИЗЕЛЬНЫМ  
И ВЕТРОВЫМ АГРЕГАТАМИ**

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексева

Расширение использования возобновляемых источников энергии является значимой тенденцией развития современной мировой энергетики. Все большее применение находят приливные электростанции, в том числе – в сочетании с другими источниками энергии. Однако для создания таких комплексов необходимо решение многих теоретических и практических задач. Эффективным подходом к их решению является математическое моделирование. Статья посвящена разработке математической модели автономной электростанции с тремя каналами генерации энергии: приливым, ветровым и дизельным. Представлена структурная схема электростанции, описаны основные параметры и особенности моделирования. Приведено детальное описание подхода к моделированию электронных преобразователей. На основе математической модели проведен анализ переходных процессов и энергетических показателей функционирования рассматриваемого комплекса. Разработанная модель может быть использована для проведения исследований режимов работы энергоустановок, входящих в состав комбинированной приливной электростанции.

**Ключевые слова:** ветроэнергетический агрегат, дизельный генератор, математическое моделирование, приливая электростанция, силовой электронный преобразователь, синхронная машина, энергетические показатели.

### **1. Введение**

Развитие мировой энергетики в XXI веке предполагает активное использование возобновляемых видов энергии: механической энергии ветра

и потоков воды, тепловой и лучистой энергии солнечного излучения, тепла Земли, химической энергии, заключенной в биомассе [1, 2]. В отличие от источников на основе минерального топлива и делящихся веществ, они практически неисчерпаемы и в то же время – экологически чисты и не связаны с затратами на разведку, добычу, транспортировку и хранение. Такие источники энергии пока уступают традиционным по стоимости и масштабам производства, но по мере развития эта разница неуклонно снижается [3, 4].

Морские энергоресурсы имеют огромные запасы энергии: поглощенной водой солнечного излучения, кинетической энергии морских волн, течений, приливов и прибоев [5-7]. Уже в настоящее время находятся сферы их экономически выгодного применения, например, при замене дизель-генераторов, обеспечивающих электроэнергией автономных потребителей на островах, или вдоль удаленной береговой зоны и т. п. Несмотря на безграничные потенциальные энергоресурсы морей и океанов, эти технологии до сих пор не получили широкого распространения. Более интенсивному их применению препятствуют естественные недостатки: большие капитальные затраты, прерывистый и случайный характер генерации энергии [8-10]. Поэтому волновые, приливные и другие морские электростанции подключаются к централизованным электрическим сетям, либо, в случае автономной работы, параллельно с ними функционируют аккумуляторные батареи или агрегаты на основе других источников возобновляемой энергии, обычно ветровые и солнечные [11-14].

Применение таких комплексов связано с решением широкого круга теоретических и практических задач, связанных как с совершенствованием агрегатов преобразования энергии, так и с улучшением технико-экономических показателей всего энергетического оборудования [15-17].

В частности, переменный характер частот и уровней напряжения вырабатываемой электроэнергии обуславливает необходимость согласования ее параметров на основе использования силовых электронных преобразователей. Они, в свою очередь, могут ухудшать гармонический состав токов и напряжений [18, 19]. Математическое моделирование таких систем обеспечивает возможность анализа энергетических и других технико-экономических показателей. Это необходимо для выработки технических решений по структурам электростанций, а также по выбору параметров отдельных узлов и элементов силовой части и управления. По этой теме авторами уже были изложены результаты разработки среды математического моделирования ветро-дизельной электростанции [20]. В настоящей статье эти результаты дополняются представлениями приливного агрегата с воспроизведением различных режимов работы и эффективными методами анализа.

## II. Расчетная схема

Для анализа разнообразных электромеханических и электромагнитных процессов в автономных электростанциях принята структурная схема (рис. 1), включающая три канала генерации энергии: дизельного ( $d$ ), ветрового ( $w$ ) и приливного ( $t$ ), эквивалентной активно-индуктивной трехфазной нагрузки ( $l$ ), резервного источника на аккумуляторной батарее ( $AC$ ) и общей шины постоянного тока ( $DC$ ). Все источники энергии: дизель  $D$ , ветроколесо  $W$  и приливной агрегат  $T$  – вращают валы генераторов с частотами  $\omega_d, \omega_w, \omega_t$ , развивая моменты  $h_d, h_w, h_t$ . В качестве электромеханических преобразователей энергии используются, как вариант, синхронные генераторы с постоянными магнитами ( $M_d, M_w$ ) и  $M_t$  – с управляемым возбуждением ( $V_T$ ). Трехфазные токи статоров генераторов ( $I_{sd}, I_{sw}, I_{st}$ ) преобразуются в постоянные управляемыми и неуправляемыми выпрямителями ( $V_d, V_w, V_t$ ). В зависимости от ситуации с потребностью нагрузки, скоростью ветра и параметрами приливного канала оператор выключателями ( $Q_d, Q_w, Q_t, Q_l, Q_{ac}$ ) коммутирует различные схемы работы электростанции. Приливной канал, являющийся основным и самым мощным, например, 400 кВт, как у Вислогубской приливной электростанции [5], предусматривает работу в различных турбинных и насосных режимах.

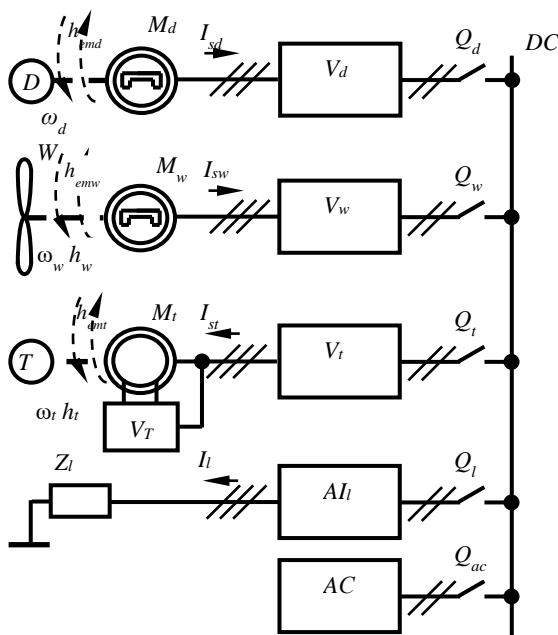


Рис.1. Структурная схема автономной электростанции

Для обобщения интерес представляет прямой насосный режим приливного агрегата, при котором он в качестве асинхронного двигателя приводит в движение насос, закачивающий воду из моря в бассейн, и осуществляет запасание энергии. Если допустить, что в это время потребление составляет 100 кВт, а мощность ветроканала – 200 кВт, то мощность потребления приливным каналом составит 100 кВт. Преобразователь приливного канала при этом работает в режиме автономного инвертора напряжения. Расчетная схема воспроизведения процессов в силовой схеме при такой ситуации предусматривает использование математических моделей синхронного генератора, асинхронного двигателя, выпрямителя и автономного инвертора напряжения, т.е., достаточно широкий набор моделей объектов (рис. 2).

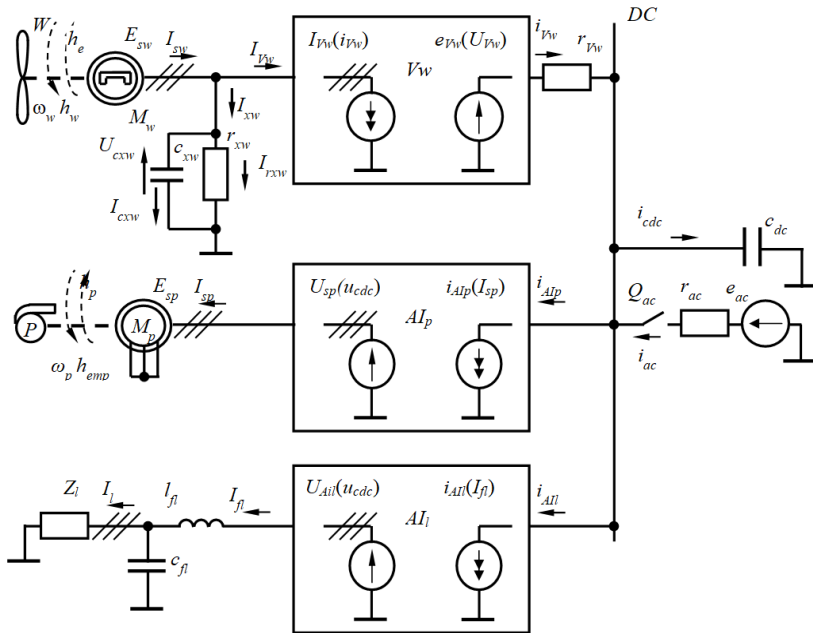


Рис. 2. Расчетная схема автономной электростанции при питании от ветроканала нагрузки и приливного агрегата, работающего в режиме прямого насоса

Для анализа энергетических показателей схемы представляется возможным упрощенное представление силовых электронных схем как идеальных преобразователей напряжения трехфазного переменного в посто-

янное и обратно [21]. Оценку влияния процессов коммутации вентилях на формы токов и напряжений целесообразно выделить в отдельную задачу и проводить в частных расчетных схемах меньшего размера. Поэтому оказывается возможным описание функционирования сложных многоконтурных схем с ключевыми элементами простыми узлами на базе зависимых источников тока и напряжения ( $V_w, A_I, A_I$ ).

### III. Моделирование электронных преобразователей

В цепи ветроканала неуправляемый выпрямитель  $V_w$  осуществляет коммутацию вентилях по шести участкам на периоде ЭДС генератора  $M_w$  в соответствии со значениями линейных напряжений, выполняя тем самым функциональное преобразование напряжений емкостей  $U_{csw}$  на входе выпрямителя в пульсирующее напряжение питания цепи постоянного тока:

$$e_{V_w} = [X_V \cdot U_{csw}]_{j_{\max}} ; X_V = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $X_V$  – топологическая матрица, обеспечивающая вычисление линейных напряжений на выходе трехфазного мостового выпрямителя,  $j_{\max}$  – номер строки, соответствующей максимальному значению вектора  $X_V \cdot U_{csw}$ . Емкости  $C_{sw}$ , соответствуют либо конденсаторам фильтра, если он имеется в реальной схеме, либо специально вводимым емкостям цепи связи статора машины и подключенной внешней схемы. В обоих случаях им в параллель включается сопротивление связи  $r_{sw}$  большой величины, согласующее цепи статора машины и входной цепи выпрямителя путем определения соотношения между токами:

$$I_{csw} = I_{sw} - I_{V_w} - r_{sw}^{-1} \cdot U_{csw}. \quad (2)$$

Вектор токов статора генератора  $I_{V_w}$ , принимается зависимым от выходного тока выпрямителя и определяется путем аналогичного функционального преобразования:

$$I_{V_w} = [X_V \cdot i_{V_w}]_{j_{\max}}, \quad (3)$$

на основе выбора строки  $j_{\max}$  из вектора  $X_V i_{V_w}$ . В свою очередь, на выход выпрямителя включается сопротивление  $r_{V_w}$  малой величины, благодаря чему согласуются цепи выпрямителя  $V_w$  и постоянного тока  $DC$ :

$$i_{Vw} = r_{Vw}^{-1} \cdot (e_{Vw} - u_{cdc}). \quad (4)$$

Емкость  $c_{dc}$  может присутствовать в схеме как элемент фильтра, либо ее с малым значением параметра следует включить искусственно.

Потребляемые входные токи ( $i_{Aip}$ ,  $i_{Ail}$ ) блоков автономных инверторов насоса приливного агрегата и эквивалентной нагрузки определяются зависимыми от токов  $I_{sp}$  и  $I_{fl}$  статора  $M_p$  и индуктивности фильтра цепи нагрузки:

$$\begin{aligned} i_{Aip} &= \text{diag}[x_{p1} \quad x_{p3} \quad x_{p5}] \cdot I_{sp}; \\ i_{Ail} &= \text{diag}[x_{l1} \quad x_{l3} \quad x_{l5}] \cdot I_{fl}, \end{aligned} \quad (5)$$

где диагональная матрица составляется из значений функций управления транзисторов нечетной или четной групп трехфазной мостовой схемы. Полагается, что при наличии импульса управления значение соответствующей функции единица, иначе ноль. Определение этих функций производится по известному алгоритму векторного управления на основе принципа широтно-импульсной модуляции.

Согласно закону частотного управления амплитуды составляющих вектора напряжений,  $U_{Aip}$  на статоре машины  $M_p$ , работающей в режиме асинхронного двигателя, зависят от частоты  $f_{sp}$  формируемого напряжения:

$$u_{Aip} = \sqrt{2} \cdot \frac{u_{snomp} \cdot f_{sp}}{f_{snom}} = \frac{u_{s \max p} \cdot f_{sp}}{f_{snom}}, \quad (6)$$

где  $u_{snom}$ ,  $f_{snom}$  – номинальные действующее значение и частота фазного напряжения машины. Аналогично через частоту напряжения нагрузки  $f_l$  находится амплитуда вектора напряжения  $U_{Ail}$ :

$$u_{Ail} = \sqrt{2} \cdot \frac{u_{nopl} \cdot f_l}{f_{lnom}} = \frac{u_{\max l} \cdot f_l}{f_{lnom}}. \quad (7)$$

Вращение векторов  $U_{Aip}$  и  $U_{Ail}$  с соответствующими угловыми частотами  $\omega_p$  и  $\omega_l$  происходит по шести секторам. Положение формируемого вектора длиной  $u_{Alj}$  ( $j = p, l$ ) определяется в пределах текущего сектора  $k_{sect}$  углом  $\varphi_j$  (рис. 3). Этот угол вычисляется в дискретные моменты времени  $t_n$ , отсчитываемые в единицах измерения времени моделирования и совпадающие с тактами  $dt_{tact}$  модуляции:

$$\phi_j = \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_j \cdot (t_n - t_{nTj})}{T_j} - (k_{\text{sect}} - 1) \cdot \frac{\pi}{3}, \quad (8)$$

где  $t_{nTj}$  – момент времени, соответствующий началу воспроизводимого периода  $T_j$  напряжения частоты  $f_j$ .

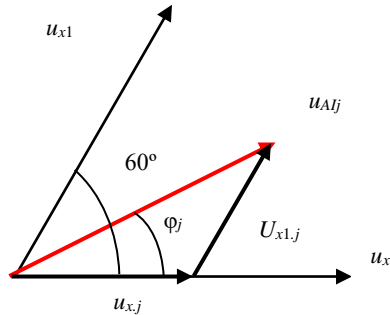


Рис.3. Формирование текущего положения вектора напряжения

Отношения длин образующих векторов  $u_{x,j}$  и  $u_{x1,j}$  к длинам базового вектора:

$$u_{Bj} = \frac{2}{3} \cdot u_{\max j} = \frac{2}{3} \cdot u_{x,j} = \frac{2}{3} \cdot u_{x1,j}, \quad (9)$$

определяет скажности, представленные ниже:

$$\gamma_{x,j} = \frac{u_j}{u_{Bj}} \cdot \frac{(\cos \varphi_j - \sin \varphi_j)}{\sqrt{3}}; \quad (10)$$

$$\gamma_{x+1,j} = \frac{u_j}{u_{Bj}} \cdot \frac{2 \cdot \sin \varphi_j}{\sqrt{3}}.$$

С применением операции округления по ним рассчитываются числа тактов  $k_{x,j}$ ,  $k_{x1,j}$  и  $k_{0j}$ , приходящиеся на эти вектора и на нулевой интервал в пределах периода модуляции ШИМ  $T_{\text{shim}}$ , состоящего из целого числа тактов:

$$\begin{aligned}
 k_{x,j} &= \text{round} \left( \frac{\gamma_{x,j} \cdot T_{shim}}{dt_{tact}} \right); \\
 k_{x+1,j} &= \text{round} \left( \frac{\gamma_{x+1,j} \cdot T_{shim}}{dt_{tact}} \right); \\
 k_{0,j} &= \frac{T_{shim}}{dt_{tact}} - k_{x,j} - k_{x+1,j}.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Образующие вектора формируются комбинациями открытых и закрытых транзисторов, совпадающими с комбинациями импульсов управления  $X_j$  согласно табл. 1.

Таблица 1.  
Формирование импульсов управления по интервалам секторов

$k_{sect}$	векторы						
	импульсы	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
1	$X$	1	0	0	1	0	1
	$X_1$	1	0	1	0	0	1
	$X_0$	1	0	1	0	1	0
2	$X$	1	0	1	0	0	1
	$X_1$	0	1	1	0	0	1
	$X_0$	0	1	0	1	0	1
3	$X$	0	1	1	0	0	1
	$X_1$	0	1	1	0	1	0
	$X_0$	1	0	1	0	1	0
4	$X$	0	1	1	0	1	0
	$X_1$	0	1	0	1	1	0
	$X_0$	0	1	0	1	0	1
5	$X$	0	1	0	1	1	0
	$X_1$	1	0	0	1	1	0
	$X_0$	1	0	1	0	1	0
6	$X$	1	0	0	1	1	0
	$X_1$	1	0	0	1	0	1
	$X_0$	0	1	0	1	0	1

На очередном шаге расчета, после определения сектора, периода ШИМ и интервала внутри него, устанавливаются векторы  $X_j$  импульсов управления, которые уже использовались в (5) для вычисления входных токов инверторов. Они же применяются для расчета трехфазных напряжений на выходе инвертора приливного агрегата:



$$\begin{aligned}
 U_{sp} &= 0, \text{ если } x_2 + x_4 + x_6 = 0; \\
 U_{sp} &= 0, \text{ если } x_2 + x_4 + x_6 = 3; \\
 U_{sp} &= \left( -\text{diag}(x_1 \ x_3 \ x_5) + \frac{2}{3} \right) \cdot u_{cdc}, \text{ если } x_2 + x_4 + x_6 = 1; \\
 U_{sp} &= \left( \text{diag}(x_2 \ x_4 \ x_6) - \frac{2}{3} \right) \cdot u_{cdc}, \text{ если } x_2 + x_4 + x_6 = 2,
 \end{aligned} \tag{12}$$

где используются значения функций управления ключей анализируемого инвертора, и в случае канала нагрузки индексы векторов напряжений меняются с «*sp*» на «*Ail*».

Важным достоинством описанного алгоритма моделирования векторного управления автономными инверторами напряжения является быстроедействие, не исключающее учет дискретности не только по частоте модуляции ШИМ, но и по тактовой частоте.

#### IV. Анализ переходных процессов

Функционирование электромеханических процессов в схеме (рис. 2) описывается на основе применения координатных преобразований Парка-Горева [22]. Уравнения состояния ветроканала при пренебрежении влиянием компенсационных контуров в статических режимах:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \Psi_{dw} &= -\omega_{rw} \cdot \Psi_{qw} - r_{sw} \cdot i_{dw} - u_{dcxw}; \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{qw} &= \omega_{rw} \cdot (\Psi_{dw} + \Psi_{fw}) - r_{sw} \cdot i_{qw} - u_{qcw}; \\
 \frac{d}{dt} \omega_{rw} &= j_w^{-1} \cdot (h_w - h_{emw}); \\
 \frac{d}{dt} \theta_{rw} &= \omega_w; \\
 \frac{d}{dt} U_{cxw} &= c_{xw}^{-1} \cdot I_{cxw},
 \end{aligned} \tag{13}$$

имеют в качестве независимых переменных:  $\Psi_{dw}$  и  $\Psi_{qw}$  – потокосцепления двухфазной эквивалентной машины по продольной поперечной осям;  $\omega_w$  и  $\theta_w$  – частота вращения и угол поворота ротора;  $U_{cxw}$  – вектор напряжений емкостей цепи связи. Потокосцепление постоянного магнита ротора  $\Psi_{fw}$  является параметром. Правые части уравнения (13) рассчитываются с использованием соотношений:

$$\begin{aligned}
 I_{dqw} &= \begin{bmatrix} l_{dw}^{-1} & 0 \\ 0 & l_{qw}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{dw} \\ \Psi_{qw} \end{bmatrix}; \\
 U_{dqxw} &= \begin{bmatrix} u_{dxw} \\ u_{qxw} \end{bmatrix} = A_{dqw} \cdot \begin{bmatrix} U_{cxw.1} \\ U_{cxw.2} \end{bmatrix}; \\
 h_{emw} &= 1,5 \cdot i_{qw} \cdot \Psi_{fw}; \\
 I_{sw} &= A_{dqw}^{-1} \cdot I_{dqw}; I_{xw} = I_{sw} - I_{Vw}; \\
 I_{rxw} &= r_{xw}^{-1} \cdot U_{cxw}; I_{cxw} = I_{xw} - I_{rxw}; \\
 A_{dqw} &= 2 / \sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\theta_{rw} + \pi/3) & \sin(\theta_{rw}) \\ \cos(\theta_{rw} + \pi/3) & \cos(\theta_{rw}) \end{bmatrix},
 \end{aligned} \tag{14}$$

где  $l_{dw}$ ,  $l_{qw}$ ,  $r_{sw}$  – индуктивности статора машины  $M_w$  по продольной и поперечной осям и активное сопротивление обмотки статора;  $j_w$  – момент инерции ветроагрегата.

Аналогичное уравнение было бы у генератора  $M_p$  канала приливного агрегата в турбинном режиме. В режиме же асинхронного двигателя, приводящего насос, его уравнение состояния имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \Psi_{dqsp} &= U_{dqsp} + \omega_{sp} \cdot B \cdot \Psi_{dqsp} - r_{sp} \cdot I_{dqsp}; \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{dqrp} &= (\omega_{sp} - \omega_{rp}) \cdot B \cdot \Psi_{dqrp} - r_{rp} \cdot I_{dqrp}; \\
 \frac{d\omega_{rp}}{dt} &= j_{rp}^{-1} \cdot (h_{emp} - h_p); \\
 \frac{d\theta_{rp}}{dt} &= \omega_{rp},
 \end{aligned} \tag{15}$$

где  $\Psi_{dqsp}$  и  $\Psi_{dqrp}$  – потокосцепления статора и ротора двухфазной эквивалентной машины  $M_p$  по продольной поперечной осям;  $\omega_p$  и  $\theta_p$  – частота вращения и угол поворота ротора. Правые части уравнения (15) рассчитываются с использованием (12) и соотношений:

$$\begin{aligned}
 A_{dqsp} &= 2/\sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\theta_{sp} + \pi/3) & \sin(\theta_{sp}) \\ \cos(\theta_{sp} + \pi/3) & \cos(\theta_{sp}) \end{bmatrix}; \\
 \theta_{sp} &= \omega_{sp} \cdot t; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \\
 U_{dqsp} &= A_{dqsp} \cdot \begin{bmatrix} u_{sp.1} \\ u_{sp.2} \end{bmatrix}; \\
 I_{dqsrp} &= L_{srp}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{dqsp} \\ \Psi_{dqrp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dqsp} \\ I_{dqrp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dsp} \\ i_{qsp} \\ i_{drp} \\ i_{qrp} \end{bmatrix}; \\
 L_{srp} &= \begin{bmatrix} l_{sp} & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_{sp} & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_{rp} & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_{rp} \end{bmatrix}; \\
 h_{emp} &= l_m \cdot (i_{qsp} \cdot i_{drp} - i_{dsp} \cdot i_{qrp}); \\
 I_{sp} &= H_1^{-1} \cdot A_{dqsp}^{-1} \cdot I_{dqsp},
 \end{aligned} \tag{16}$$

где  $l_{sp}$ ,  $l_{rp}$ ,  $r_{sp}$ ,  $r_{rp}$  – индуктивности и активные сопротивления обмоток статора и ротора машины  $M_p$  в режиме работы асинхронным двигателем;  $j_p$  – момент инерции приливного агрегата.

Уравнение состояния трехфазной эквивалентной активно-индуктивной нагрузки  $r_l - l_l$ :

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} I_{hl} &= L_{hl}^{-1} \cdot (U_{hcf1} - R_{hl} \cdot I_{hl}); \\
 \frac{d}{dt} I_{All} &= l_{\beta}^{-1} \cdot (U_{All} - U_{hcf1} - r_{\beta} \cdot I_{All}); \\
 \frac{d}{dt} U_{cf1} &= c_{\beta}^{-1} \cdot (I_l - I_{All}),
 \end{aligned} \tag{17}$$

имеет в качестве независимых переменных контурные токи  $I_{hl}$  цепи нагрузки, токи  $I_{\beta}$  индуктивностей и напряжения емкостей  $U_{cf1}$  фильтра,

имеющего параметры  $l_{fl}$ ,  $r_{fl}$ ,  $c_{fl}$ . Правые части (17) рассчитываются с учетом (12) и соотношений:

$$U_{chl} = H_1 \cdot U_{cftoad}; I_l = H_1' \cdot I_{hl}; H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix};$$

$$L_{hl} = H_1 \cdot \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} \cdot H_1'; R_{hl} = H_1 \cdot \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \cdot H_1'. \quad (18)$$

Шина постоянного тока, связывающая каналы схемы, имеет, как минимум, один инерциальный параметр – емкость  $c_{dc}$ , которой может являться реальная конденсаторная батарея фильтра или искусственно введенная малая емкость связи. Уравнение состояния напряжения этой емкости выражается с использованием результатов расчета ЭДС питания на выходе ветроканала (1) и токов, потребляемых каналом насоса приливного агрегата и эквивалентной нагрузки (5):

$$\frac{du_{cdc}}{dt} = c_{dc}^{-1} \cdot \left( r_{vw}^{-1} \cdot (e_{vw} - u_{cdc}) - i_{Atp} - i_{All} \right). \quad (19)$$

### V. Анализ энергетических показателей

Важным этапом анализа эффективности принимаемых технических решений является определение интегральных показателей качества функционирования устройств. Для анализа энергетических показателей, важнейших из них, предусматривается гармонический анализ кривых функций  $F$  фазных токов  $I_j$  и напряжения  $U_j$ . При воспроизведении соответствующих процессов эти кривые получают в виде массивов из значений  $F_{j(n)}$  ( $n = 1, 2, \dots, N_{dt}$ ) на периоде  $T$  с одинаковым шагом  $dt$ . Гармонические составляющие фазных токов и напряжений находятся по формулам:

$$F_{A,j(k)} = \sum_{n=1}^{N_{dt}} F_{j(n)} \cdot \cos \left( k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{T} \cdot n \cdot dt \right);$$

$$F_{B,j(k)} = \sum_{n=1}^{N_{dt}} F_{j(n)} \cdot \sin \left( k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{T} \cdot n \cdot dt \right). \quad (20)$$

В случае симметрии параметров фаз индекс « $j$ » может опускаться.

Предполагается, что число  $N_k$  гармонических составляющих, удовлетворяет условию:

$$\frac{N_{dt}}{N_k} \geq K_{\min}, \quad (21)$$

где необходимое число точек для определения гармоника  $K_{\min} = 16 \div 20$ .

По составляющим «А» и «В» вычисляются амплитуды и фазы гармоник:

$$F_{\max j(k)} = \sqrt{F_{Aj(k)}^2 + F_{Bj(k)}^2};$$

$$\varphi_{j(k)} = \arctan \frac{F_{Aj(k)}}{F_{Bj(k)}}. \quad (22)$$

Действующие значения тока и напряжения вычисляются как среднеквадратичные мгновенных значений при постоянном шаге:

$$F_{eff-j} = \sqrt{\frac{1}{N_{dt}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{dt}} F_{j(n)}^2}. \quad (23)$$

Полная электрическая мощность, потребляемая или отдаваемая двигателем, находится по эффективным значениям фазных токов и напряжений:

$$S_{el} = \sum_{j=1,2,3} I_{eff-j} \cdot U_{eff-j}. \quad (24)$$

Активная и реактивная мощности, потребляемые или отдаваемые СДПМ, находятся по первым гармоническим составляющим фазных токов и напряжений [23]:

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1,2,3} I_{\max j(1)} \cdot U_{\max j(1)} \cdot \cos(\varphi_{Uj(1)} - \varphi_{Ij(1)});$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1,2,3} I_{\max j(1)} \cdot U_{\max j(1)} \cdot \sin(\varphi_{Uj(1)} - \varphi_{Ij(1)}). \quad (25)$$

Мощность несимметрии появляется в случае фазного различия параметров нагрузки и находится по формуле:

$$Q_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_{\text{eff.1}} \cdot \sqrt{2 \cdot \sum_{j=1,2,3} I_{\max j(1)}^2 - \sum_{\substack{g,q=1,2,3 \\ g \neq q}} I_{\max g(1)} \cdot I_{\max q(1)} \cdot \cos(\varphi_{g(1)} - \varphi_{q(1)})}, \quad (26)$$

где из суммы квадратов амплитуд первых гармоник токов фаз вычитаются все возможные комбинации произведений этих амплитуд на косинусы разностей углов отставаний первых гармоник токов от напряжений.

Мощность искажений, потребляемая или отдаваемая двигателем, находится как квадратичный остаток от полной мощности:

$$Q_2 = \sqrt{S_{el}^2 - P_1^2 - Q_1^2 - Q_3^2}. \quad (27)$$

При известных значениях полной мощности, её составляющих, эквивалентном активном сопротивлении нагрузки рассчитываются коэффициенты мощности, сдвига, искажений и полезного действия.

Формулы для определения коэффициентов мощности, сдвига, искажений, несимметрии и полезного действия:

$$\begin{aligned} k_M &= \frac{P_1}{S_{el}}; k_C = \sqrt{\frac{P_1^2}{P_1^2 + Q_1^2}}; k_2 = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + Q_2^2}}; \\ k_3 &= \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + Q_2^2}}{S_{el}}; \eta = \frac{3r_l \cdot I_{\text{eff.1}}^2 + h_{\text{emh}} \cdot \omega_{rp}}{h_{\text{emv}} \cdot \omega_{rv}}. \end{aligned} \quad (28)$$

## VI. Результаты количественного анализа

Учет нагрузок агрегатов в реальных эксплуатационных режимах необходим для обеспечения достоверности результатов моделирования и осуществляется с применением аппроксимации имеющихся технических характеристик агрегатов. В частности, для дизель-генераторного канала можно использовать регулировочные характеристики, устанавливающие реализуемое соотношение между моментом на валу и его частотой вращения [20]. Для агрегата приливной электростанции аппроксимируются расходно-напорные характеристики Q-H. Например, в режиме прямого насоса у Вислогубской приливной электростанции мощностью 400 кВт [24, рис. 6.1] семейство характеристик притока воды из моря в бассейн представляется формулой:

$$Q_P = \sum_{k=1}^4 q_{PK} \cdot H^{k-1}, \quad (29)$$

где для значения коэффициентов мощности  $q_P = [-50, -35, -2, -5]$  м<sup>3</sup>/с при мощности 400 кВт. Для меньших мощностей  $q_{P(1)}$  значения изменяются от -50 до -32 (рис. 4). На основе аппроксимационных зависимостей типа (29) можно программным путем определять нагрузки силовых элементов.

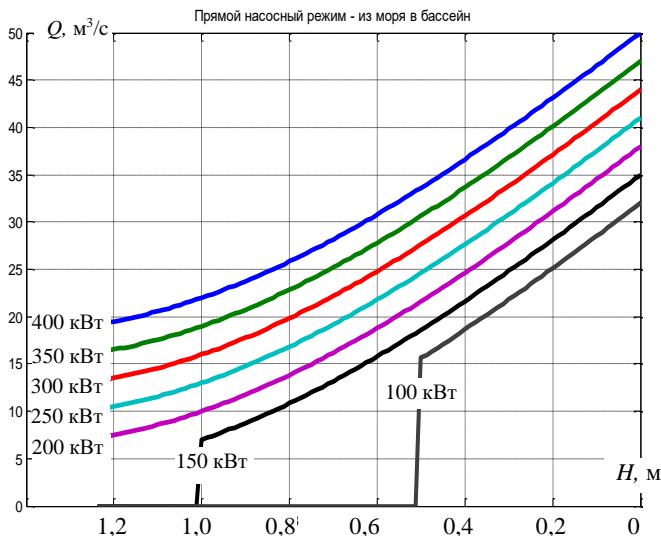


Рис. 4. Аппроксимированные расходно-напорные характеристики приливного агрегата Вислогубской ПЭС в режиме прямого насоса

Ранее упоминался режим работы системы с питанием от ветроканала, когда имеющийся избыток мощности 100 кВт используется для закачивания воды в бассейн. Если уровень воды в нем на 0,5 м выше уровня моря, то, согласно характеристикам (рис. 4), будет обеспечена производительность 15 м<sup>3</sup>/с. Для рассматриваемых механизмов характерны кубическая зависимость мощности и квадратичная момента от частоты вращения. Поэтому с использованием известных номинальных значений момента  $h_{ном}$  и частоты  $\omega_{ном}$ , рассчитываются требуемая синхронная частота вращения, определяющая параметры  $AI_p$ , и соответствующий ей момент на валу насоса для режима с мощностью  $P_p$ :

$$\omega_{0p} = \omega_{0номр} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_p}{P_{ном}}} = \omega_{0номр} \cdot \sqrt[3]{\frac{100}{400}} = 0,63 \cdot \omega_{0номр} = 0,63 ;$$

$$h_p = \frac{P_p}{P_{ном}} \cdot \frac{\omega_{0p}}{\omega_{0номр}} = 0,25 \cdot 0,63 = 0,4 ,$$
(30)

где используется представление параметров и физических переменных в относительных единицах. В качестве базисного режима взят номинальный режим нагрузки, по параметрам которого приняты основные базисные величины (табл. 2).

Таблица 2.  
Параметры базисного режима  
и основные базисные величины расчетной схемы электростанции

Величина	Обозначение	Формула	Значение	Ед. изм.
Активная мощность трехфазной нагрузки	$P_l$	–	400	кВт
Коэффициент мощности нагрузки	$\cos \varphi_l$	–	0,707	–
Полная мощность трехфазной нагрузки	$S_l$	$P_l / \cos \varphi_l$	566	кВА
Угловая частота напряжения	$f_l$	–	50	Гц
Действующее значение фазного напряжения	$U_l$	–	220	В
Действующее значение фазного тока	$I_l$	$S_l / (3 \cdot U_l)$	857	А
Базисное напряжение	$U_B$	$\sqrt{2} \cdot U_l$	311	В
Базисный ток	$I_B$	$\sqrt{2} \cdot I_l$	1212	А
Базисная угловая частота	$\omega_B$	$2 \cdot \pi \cdot f_l$	314,1593	1/с
Базисный угол поворота	$\theta_B$	–	1	–

В рассматриваемом примере эквивалентная трехфазная нагрузка 100 кВт реализуется при параметрах:

$$\cos \varphi_l = 0,707 ; z_l = \frac{3 \cdot U_{ном}^2 \cdot \cos \varphi_l}{P_l \cdot R_B} = \frac{3 \cdot 0,707 \cdot 220^2}{100 \cdot 10^3 \cdot 0,257} = 4 ;$$

$$r_l = z_l \cdot \cos \varphi_l = 2,83 ; l_l = z_l \cdot \sin \varphi_l = 2,83 .$$
(30)



Фильтр, применяемый в цепи нагрузки, приближенно настроен на погашение 5-7 гармоник и имеет параметры  $I_{fl} = 0,286$ ,  $c_{fl} = 3,88$  о.е. Воспроизведение статического режима при указанных данных дало сочетание показателей (табл. 3), демонстрирующее возможность эффективной реализации этого и других режимов работы комплекса автономной электростанции. На рис. 5 представлены расчетные диаграммы фазных токов и напряжений нагрузок в рассматриваемом статическом режиме. В алгоритме ШИМ применены тактовая частота 18 кГц и частота модуляции 1,8 кГц.

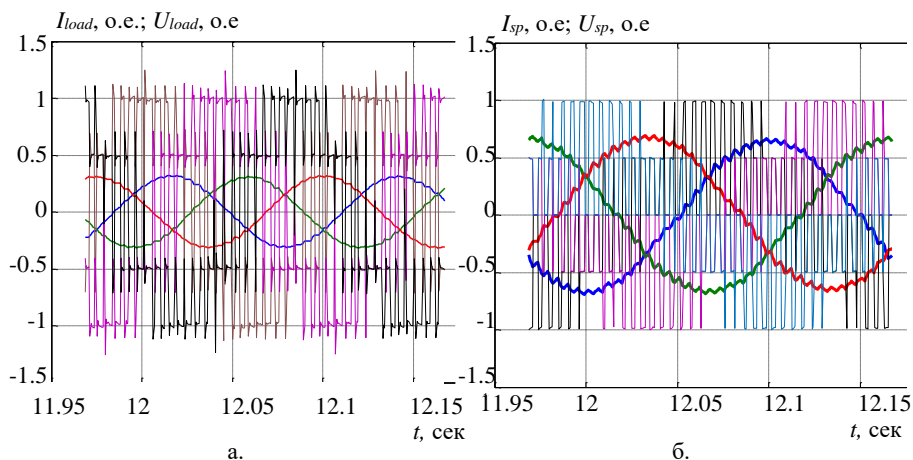


Рис. 5. Расчетные диаграммы токов и напряжений фаз нагрузки перед фильтром (а) и статора машины насосного агрегата в режиме двигателя насоса (б)

Таблица 3  
Интегральные показатели канала нагрузки после фильтра в относительных единицах

$I_{effload}$	$U_{effload}$	$\cos\varphi_{load}$	$S_{elload}$	$S_{el1load}$	$P_{elload}$	$Q_{1load}$	$Q_{2load}$	$k_{mload}$	$k_{sload}$	$k_{2load}$
0,220	0,715	0,709	0,472	0,408	0,289	0,288	0,236	0,614	0,709	0,866

На рис. 6 приведены спектры гармоник тока и напряжения нагрузки в рассматриваемом режиме.

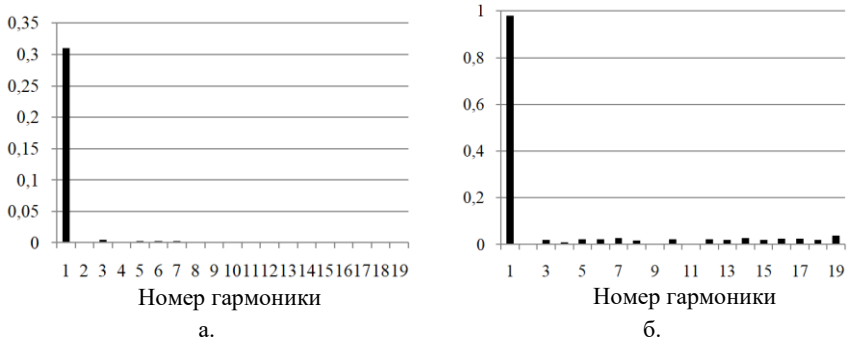


Рис. 6. Расчетные спектры гармоник фазных тока (а) и напряжения (б) нагрузки в статическом режиме в относительных единицах

## VII. Выводы

Разработана математическая модель комплекса автономной электростанции, построенной на основе приливного агрегата и использующей другие источники энергии в качестве резервных. Применены эффективные алгоритмы отображения функционирования электромашинных агрегатов в комплексе с силовыми электронными преобразователями параметров электрической энергии. Показана возможность детального анализа различных режимов работы агрегатов, включая функционирование приливного агрегата турбиной и насосом.

© Байков А.И., 2018

© Дарьенков А.Б., 2018

© Куркин А.А., 2018

© Соснина Е.Н., 2018

## Библиографический список

- [1] Twidell J. Renewable Energy Resources. Routledge, L.-NY, 2015. – 784 p.
- [2] Иванникова Е. М. Возобновляемые источники энергии в Российской Федерации и поддержка государства // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 17-18. С. 172-175.
- [3] Ellabanna O., Abu-ubb H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. № 39. Pp. 748-764.
- [4] Renewables 2017. Global Status Report in perspective. Renewable Energy Policy Network for the 21st century, June 11, 2017. – 43 p.
- [5] Ocean Energy Forum (2016). Ocean Energy Strategic Roadmap 2016, building ocean energy for Europe. Technical Report. European Commission: Brussels, Belgium, 2016. – 74 p.

- [6] Contestabile P., Ferrante V., Vicinanza D. Wave energy resource along the coast of Santa Catarina (Brazil) // *Energies*. 2015. № 8 (12). Pp. 14219-14243.
- [8] Tidal Energy. Technology Brief. IRENA Ocean Energy Technology Brief, June 3, Abu Dhabi, UAE. 2014.
- [9] Moghadasi A., Sarwat A, Guerrero J.M. A Comprehensive Review of Low-Voltage- Ride-Through Methods for Fixed-Speed Wind Power Generators // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. № 55. Pp. 823-839.
- [10] Gorji-Bandpy M., Azimi M., Jouya M. Tidal energy and main resources in the Persian Gulf // *Distributed Generation and Alternative Energy*. 2013. № 82. Pp. 61-77.
- [11] Kocaman A.S., Abad C., Troy T.J., Huh W.T., Modi V. A stochastic model for a macroscale hybrid renewable energy system // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. № 54. Pp. 688-703.
- [12] Li Y., McCalley J.D. Design of a high capacity inter-regional transmission overlay for the US // *IEEE Trans. Power Syst.* 2015. № 30 (1). Pp. 513-521.
- [13] Maheshwari Z., Ramakumar R. Smart Integrated Renewable Energy Systems (SIREs): A Novel Approach for Sustainable Development // *Energies*. 2017. № 10 (8). P. 1145.
- [14] Wan Y., Fan C., Dai Y., Li L., Sun W., Zhou P., Qu X. Assessment of the joint development potential of wave and wind energy in the South China Sea // *Energies*. 2018. № 11 (2). C. 398.
- [15] Powell K.M., Rashid K., Ellingwood K., Tuttle J., Brian D. B.D. Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. № 80. Pp. 215-237.
- [16] Renzi E., Dias F. Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean // *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 2013. № 41. Pp. 1-10.
- [17] Devolder B., Stratigaki V., Troch P., Rauwoens P. CFD simulations of floating point absorber wave energy converter arrays subjected to regular waves // *Energies*. 2018. № 11 (3). P. 641.
- [18] Mustafa S.S., Misron N., Othman M.L., Tsuyoshi H. Power characteristics analysis of a novel double-stator magnetic geared permanent magnet generator // *Energies*. 2017. № 10 (12). P. 2048.
- [19] Vujacic M. Theoretical and experimental investigation of switching ripple in the DC-link voltage of single-phase H-bridge PWM inverters // *Energies*. 2017. № 10 (8). P. 1189.
- [20] Bierhoff M.H., Fuchs F.W. DC-link harmonics of three-phase voltage source converters influenced by the pulsewidth-modulation strategy – An analysis // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008. № 55. Pp. 2085-2092.
- [21] Байков А.И., Дарьенков А.Б., Соснина Е.Н. Имитационное моделирование ветро-дизельной электростанции // *Электротехника*. 2018. № 3. С. 26-33.
- [22] Khan S.S. Modeling of MMC for fast and accurate simulation of electromagnetic transients // *Energies*. 2017. № 10. P. 1161.
- [23] Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. Л.-М.: ГЭИ, 1950. – 552 с.
- [24] Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. М.: Энергия, 1978. – 320 с.
- [25] Бернштейн Л.Б., Силаков В.Н., Гельфер С.Л. Приливные электростанции. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.

**A.I. Baikov, A.B. Dar'enkov, A.A. Kurkin, E.N. Sosnina**

**APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING  
FOR POWER QUALITY ANALYSIS OF ENERGY  
PRODUCED BY TIDAL POWER STATIONS  
WITH AUXILIARY DIESEL AND WIND UNITS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The current trend in the development of world energy is the expansion of the use of renewable energy sources. Tidal power stations, including in combination with other energy sources, are finding increasing use. However, the creation of such complexes requires the solution of many theoretical and practical problems. An effective approach to solving them is mathematical modeling. The article is devoted to the development of a mathematical model of an autonomous power plant with three channels of energy generation - tidal, wind and diesel. The block diagram of the power station is presented, the main parameters and features of the simulation are described. A detailed description of the approach to modeling electronic converters is given. On the basis of the mathematical model, an analysis of transient processes and energy indicators of the functioning of the complex under consideration has been carried out. The developed model can be used to study the operating modes of power plants that are part of a combined tidal power station.

**Keywords:** diesel-generator, energy performance, mathematical modeling, power electronic converter, synchronous machine, tidal power, wind power unit.

**References**

- [1] J. Twidell, Renewable Energy Resources. Routledge, London and New York, 2015.
- [2] E. M. Ivannikova, V.G. Sister, A.P. Vasilenko, E.S. Koltsova and Y.M. Ivannikova. Renewables in the Russian Federation and support of the state // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), vol. 17-18, pp. 172-175, 2015.
- [3] O. Ellabbana, H. Abu-Rubb and F. Blaabjerg. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 39, pp. 748-764, Nov. 2014.
- [4] Renewables 2017 Global Status Report in perspective. Renewable Energy Policy Network for the 21st century, June 11, 2017.
- [5] Ocean Energy Forum (2016). Ocean Energy Strategic Roadmap 2016, building ocean energy for Europe. Technical Report. European Commission: Brussels, Belgium, 2016.
- [6] P. Contestabile, V. Ferrante and D. Vicinanza. Wave energy resource along the coast of Santa Catarina (Brazil) // Energies, vol. 8, no. 12, pp. 14219-14243, 2015.

- [8] Tidal Energy. Technology Brief. IRENA Ocean Energy Technology Brief. June 3, Abu Dhabi, UAE. 2014.
- [9] A. Moghadasi, A. Sarwat and J.M. Guerrero. A Comprehensive Review of Low-Voltage-Ride-Through Methods for Fixed-Speed Wind Power Generators» // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 55, pp. 823-839, 2016.
- [10] M. Gorji-Bandpy, M. Azimi and M. Jouya. Tidal energy and main resources in the Persian Gulf // Distributed Generation and Alternative Energy, vol. 82, no. 2, pp. 61-77, 2013.
- [11] A.S. Kocaman, C. Abad, T.J. Troy, W.T. Huh and V. Modi. A stochastic model for a macroscale hybrid renewable energy system // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 54, pp. 688-703, 2016.
- [12] Y. Li, and J.D. McCalley. Design of a high capacity inter-regional transmission overlay for the US // IEEE Trans. Power Syst, vol. 30, no. 1, pp. 513-521, 2015.
- [13] Z. Maheshwari and R. Ramakumar. Smart integrated renewable energy systems (SIREs): a novel approach for sustainable development // Energies, vol. 10, no. 8, pp. 1145, 2017.
- [14] Y. Wan, C. Fan, Y. Dai, L. Li, W. Sun, P. Zhou and X. Qu. Assessment of the joint development potential of wave and wind energy in the South China Sea // Energies, vol. 11, no. 2, pp. 398, 2018.
- [15] K.M. Powell, K. Rashid, K. Ellingwood, J. Tuttle and B.D. Iverson, «Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 215-237, 2017.
- [16] E. Renzi and F. Dias. Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean // European Journal of Mechanics-B/Fluids, vol. 41, pp. 1-10, 2013.
- [17] B. Devolder, V. Stratigaki, P. Troch and P. Rauwoens. CFD simulations of floating point absorber wave energy converter arrays subjected to regular waves // Energies, vol. 11, no. 3, pp. 641, 2018.
- [18] S.S. Mustafa, N. Mison, M.L. Othman and H. Tsuyoshi. Power characteristics analysis of a novel double-stator magnetic geared permanent magnet generator // Energies, vol. 10, no. 12, pp. 2048, 2017.
- [19] M. Vujacic. Theoretical and experimental investigation of switching ripple in the DC-link voltage of single-phase H-bridge PWM inverters // Energies, vol. 10, no. 8, pp. 1189, 2017.
- [20] M.H. Bierhoff and F.W. Fuchs. DC-link harmonics of three-phase voltage source converters influenced by the pulse width-modulation strategy. An analysis // IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 55, pp. 2085-2092, 2008.
- [21] A.I. Baykov, A.B. Dar'enkov and E.N. Sosnina, Simulation modeling of the wind-diesel power station // Electrical Engineering, vol. 3, pp. 26-33, 2018.
- [22] S.S. Khan. Modeling of MMC for fast and accurate simulation of electromagnetic transients // Energies, vol. 10, pp. 1161, 2017.
- [23] A.A. Gorev, Transients of a synchronous machine. L-M.: GEI, 1950.
- [24] O.A. Mayevsky, Energy performance valve converters. M.: Energy, 1978.
- [25] L.B. Bernstein, V.N. Silakov and S.L. Gelfer, Tidal power. M.: Energoatomizdat, 1987.