

Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.313.323

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

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИЛИВНОГО АГРЕГАТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводятся результаты разработки математических моделей для анализа энергетических показателей приливной электростанции со вспомогательными дизель-электрическими ветровым агрегатами при различных исполнениях силовой электрической части на основе силовых электронных преобразователей параметров электроэнергии, имеющих микропроцессорную систему управления. Анализ статических и динамических режимов работы электростанции в целом и ее отдельных структур на основе компьютерного моделирования детерминированных и случайных процессов функционирования позволяет получить необходимую информацию для выбора технических решений при разработке энергоэффективных локальных систем электроснабжения.

The results of the development of mathematical models for the analysis of the power indices of a tidal power station with auxiliary diesel-electric wind aggregates under various designs of a power electrical part based on power electronic converters of electric power parameters having a microprocessor control system are given. The analysis of static and dynamic modes of operation of a power plant and its separate structures on the basis of computer modeling of deterministic and random processes of functioning makes it possible to obtain the necessary information for the selection of technical solutions for the development of energy efficient local power supply systems.

Ключевые слова: математическое моделирование, приливная электростанция, дизель-генератор, ветроэнергетический агрегат, синхронная машина, силовой электронный преобразователь, энергетические показатели.

Key words: mathematical modeling, tidal power station, diesel generator, wind power unit, synchronous machine, power electronic converter, power indicators.

Введение

Развитие мировой энергетики в XXI в. 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 не связаны с дорогостоящими разведкой, добычей, транспортировкой и хранением, экологически чисты. Они пока уступают тра-

диционным источникам по стоимости и масштабам производства, но по мере развития эта разница неуклонно снижается [3, 4].

Морские энергоресурсы [5] имеют огромные запасы энергии – поглощенного водой солнечного излучения, кинетической энергии морских волн [6, 7], течений, приливов [8] и прибоя. Уже в настоящее время находятся сферы их экономически выгодного применения – при замене дизель - генераторов, обеспечивающих электроэнергией автономных потребителей на островах, вдоль удаленной береговой зоны и т. п. Несмотря на безграничные потенциальные энергоресурсы морей и океанов, эти технологии до сих пор не получили широкого распространения. Их более интенсивному применению препятствуют большие капитальные затраты, прерывистый и случайный характер генерации энергии [9, 10, 11]. Поэтому волновые, приливные и другие морские электростанции подключаются к централизованным электрическим сетям [12], либо (в случае автономной работы), параллельно с ними функционируют аккумуляторные батареи [13] или агрегаты на основе других источников возобновляемой энергии, обычно ветровые и солнечные [14, 15].

Применение таких комплексов требует решения широкого круга теоретических и практических задач, связанных как с совершенствованием агрегатов преобразования энергии [16, 17, 18], так и улучшением технико-экономических показателей остального энергетического оборудования. В частности, переменный характер частот и уровней напряжения вырабатываемой электроэнергии обуславливает необходимость согласования ее параметров на основе использования силовых электронных преобразователей. А они, в свою очередь, могут ухудшать гармонический состав токов и напряжений [19, 20]. Математическое моделирование таких систем обеспечивает возможность анализа энергетических и других технико-экономических показателей. Это необходимо для выработки технических решений как по структурам электростанций, так и выбору параметров отдельных узлов и элементов силовой части и управления. По этой теме авторами были изложены результаты разработки среды математического моделирования ветро - дизельной электростанции [21], которые в настоящей статье дополняются представлениями приливного агрегата с воспроизведением различных режимов работы и эффективными методами анализа.

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 . Источники энергии – дизель D , ветроколесо W и приливной агрегат T врашают валы генераторов с частотами ω_d , ω_w , ω_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 возбудителем 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.

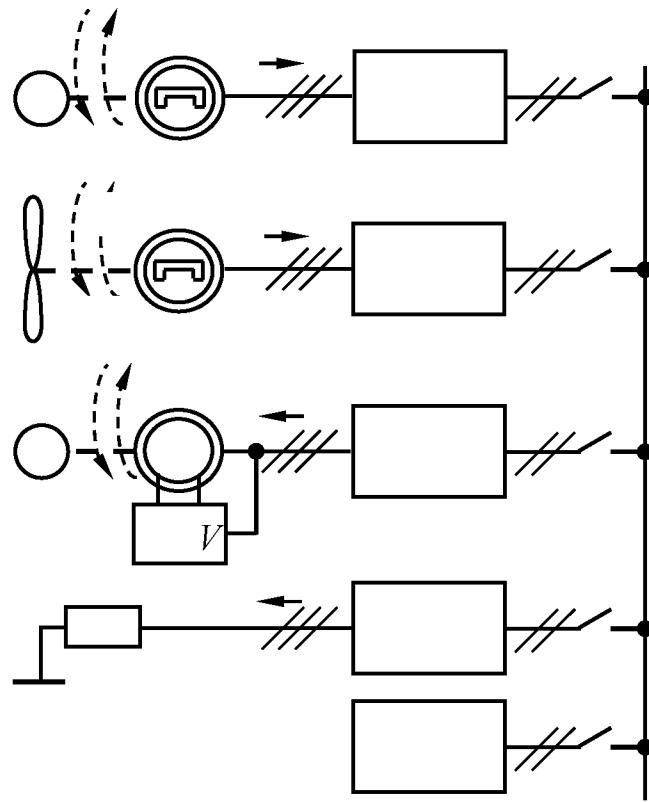


Рис. 1. Структурная схема автономной электростанции:

D , W , T – дизель, ветроколесо, турбина; M_d , M_w , M_t – генераторы и V_d , V_w , V_t – выпрямители дизель - генераторного, ветрового и приливного каналов; V_T – управляемый выпрямитель возбуждения синхронного генератора M_t ; A_{il} , Z_l – автономный инвертор напряжения и эквивалентный импеданс цепи нагрузки; A_c – аккумуляторная батарея; Q – выключатели; dc – шина постоянного тока

Приливной канал, являющийся основным и самым мощным (например, мощностью 400 кВт, как у Вислогубской приливной электростанции [5]), предусматривает работу в различных турбинных и насосных режимах. С точки зрения 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, запасая энергию. 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 (рис. 2) предусматривает использование математических моделей синхронного генератора, асинхронного двигателя, выпрямите-

ля и автономного инвертора напряжения, т.е. достаточно широкий набор моделей объектов.

Для анализа энергетических показателей схемы представляется возможным упрощенное представление силовых электронных схем как идеальных преобразователей напряжения трехфазного переменного в постоянное и обратно [22]. Оценку влияния процессов коммутации вентилей 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 , AI_p , AI_l .

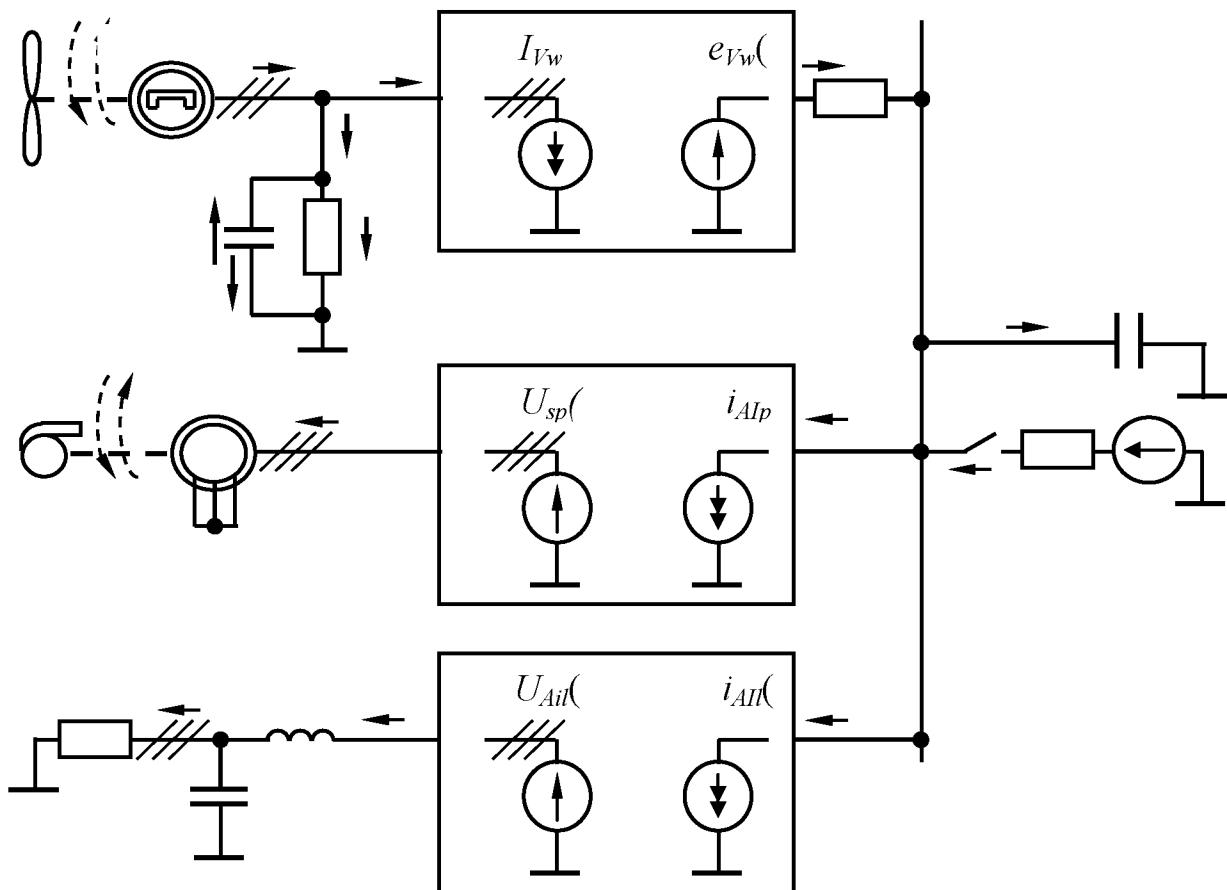


Рис. 2. Расчетная схема автономной электростанции при питании от ветроканала нагрузки и приливного агрегата, работающего в режиме прямого насоса:

W, P – ветроколесо и насос; M_w, V_w – синхронный генератор с постоянными магнитами и выпрямитель ветроканала; M_p – машина приливного канала, работающая в режиме асинхронного двигателя; AI_p, AIl – автономные инверторы напряжения приливного канала и цепи нагрузки; Z_l – эквивалентный импеданс цепи нагрузки; r_{xw}, r_{Vw}, c_{xw} – активные сопротивления и емкости цепей связи; I_f, C_f – индуктивность и емкость фильтра нагрузки; Q_{ac}, r_{ac}, e_{ac} – выключатель, активное сопротивление и ЭДС аккумуляторной батареи; dc – шина постоянного тока с емкостью c_{dc}

Моделирование электронных преобразователей

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

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

где X_V - топологическая матрица, обеспечивающая вычисление линейных напряжений на выходе трехфазного мостового выпрямителя; j_{\max} – номер строки, соответствующей максимальному значению вектора $X_V U_{cxw}$. Емкости C_{xw} 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_{xw} большой величины, согласующее цепи статора машины и входной цепи выпрямителя путем определения соотношения между токами:

$$I_{cxw} = I_{sw} - I_{Vw} - r_{xw}^{-1} U_{cxw}. \quad (2)$$

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

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

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

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

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

Потребляемые входные токи i_{Alp} , i_{All} блоков автономных инверторов носит приливного агрегата и эквивалентной нагрузки определяются зависимыми от токов I_{sp} и I_{fl} статора M_p и индуктивности фильтра цепи нагрузки:

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

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_{Alp} на статоре машины M_p , работающей в режиме асинхронного двигателя, зависят от частоты f_{sp} формируемого напряжения

$$u_{Alp} = \sqrt{2} \frac{u_{snom} f_{sp}}{f_{snom}} = \frac{u_{smax} p f_{sp}}{f_{snom}}, \quad (6)$$

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

$$u_{All} = \sqrt{2} \frac{u_{noml} f_l}{f_{lnom}} = \frac{u_{maxl} f_l}{f_{lnom}}. \quad (7)$$

Вращение векторов U_{Aip} и U_{All} с соответствующими угловыми частотами ω_p и ω_l происходит по шести секторам. Положение формируемого вектора длиной u_{Alj} ($j=p, l$) определяется в пределах текущего сектора k_{sect} углом φ_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:

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

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

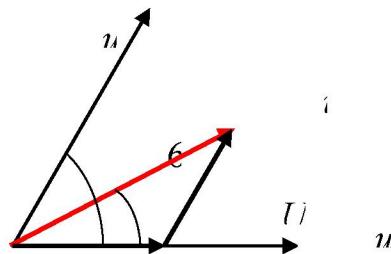


Рис.3. Формирование текущего положения вектора напряжения

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

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

определяет скважности:

$$\gamma_{x,j} = \frac{u_j}{u_{Bj}} \frac{(\cos \varphi_j - \sin \varphi_j)}{\sqrt{3}}, \gamma_{x+1,j} = \frac{u_j}{u_{Bj}} \frac{2 \sin \varphi_j}{\sqrt{3}}. \quad (10)$$

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

$$k_{x,j} = \text{round} \left(\frac{\gamma_{x,j} T_{shim}}{dt_{tact}} \right), k_{x+1,j} = \text{round} \left(\frac{\gamma_{x+1,j} T_{shim}}{dt_{tact}} \right), k_{0,j} = \frac{T_{shim}}{dt_{tact}} - k_{x,j} - k_{x1,j}. \quad (11)$$

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

Таблица 1

Формирование импульсов управления по интервалам секторов

k_{sect}	импульсы вектора	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, ко-

торые уже использовались в (5) для вычисления входных токов инверторов. Они же применяются для расчета трехфазных напряжений на выходе инвертора приливного агрегата:

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

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

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

Анализ переходных процессов

Функционирование электромеханических процессов в схеме (рис. 2) описывается на основе применения координатных преобразований Парка - Горева [23]. Уравнения состояния ветроканала при пренебрежении влиянием компенсационных контуров в статических режимах

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

имеют в качестве независимых переменных: ψ_{dw} и ψ_{qw} – потокосцепления двухфазной эквивалентной машины по продольной и поперечной осям; ω_w и θ_w – частота вращения и угол поворота ротора; U_{cxw} – вектор напряжений емкостей цепи связи. Потокосцепление постоянного магнита ротора ψ_{fp} является пара-

метром. Правые части уравнения (13) рассчитываются с использованием соотношений:

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

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

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

где Ψ_{dqsp} , и Ψ_{dqrp} – потокосцепления статора и ротора двухфазной эквивалентной машины M_p по продольной и поперечной осям; ω_p и θ_3 – частота вращения и угол поворота ротора. Правые части уравнения (15) рассчитываются с использованием (12) и соотношений:

$$\begin{aligned}
 A_{dqsp} &= 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{sp} + \pi/3) & \sin(\theta_{sp}) \\ \cos(\theta_{sp} + \pi/3) & \cos(\theta_{sp}) \end{bmatrix}, \theta_{sp} = \omega_{sp} t, B = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \\
 U_{dqsp} &= A_{dqsp} \begin{bmatrix} u_{sp.1} \\ u_{sp.2} \end{bmatrix}, I_{dqsrp} = L_{srp}^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_{dqsp} \\ \Psi_{dqrp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dqsp} \\ I_{dqrp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dsp} \\ i_{qsp} \\ i_{drp} \\ i_{qrp} \end{bmatrix}, L_{srp} = \begin{bmatrix} l_{sp} & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_{sp} & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_{rp} & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_{rp} \end{bmatrix}, \tag{16} \\
 h_{emp} &= l_m (i_{qsp} i_{drp} - i_{dsp} i_{qrp}), I_{sp} = H'_1 A_{dqsp}^{-1} I_{dqsp},
 \end{aligned}$$

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 - I_l

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{hl} &= L_{hl}^{-1} (U_{hcfl} - R_{hl} I_{hl}), \\ \frac{d}{dt} I_{All} &= l_{fl}^{-1} (U_{All} - U_{hcfl} - r_{fl} I_{All}), \\ \frac{d}{dt} U_{cfl} &= c_{fl}^{-1} (I_l - I_{All}) \end{aligned} \quad (17)$$

имеет в качестве независимых переменных контурные токи I_{hl} цепи нагрузки, токи I_{fl} индуктивностей и напряжения емкостей U_{cfl} фильтра, имеющего параметры l_{fl} , r_{fl} , c_{fl} . Правые части (17) рассчитываются с учетом (12) и соотношений:

$$\begin{aligned} U_{cfl} &= H_1 U_{cfl,load}, \quad I_l = H_1' I_{hl}, \quad H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \\ L_{hl} &= H_1 \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} H_1', \quad R_{hl} = H_1 \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} H_1'. \end{aligned} \quad (18)$$

Шина постоянного тока, связывающая каналы схемы, имеет, как минимум, один инерциальный параметр – емкость c_{dc} , которой может являться реальная конденсаторная батарея фильтра, или же 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):

$$\frac{du_{cdc}}{dt} = c_{dc}^{-1} (r_{Vw}^{-1} (e_{Vw} - u_{cdc}) - i_{Alp} - i_{All}). \quad (19)$$

Анализ энергетических показателей

Важным этапом анализа эффективности принимаемых технических решений является определение интегральных показателей качества функционирования устройств. Для анализа важнейших из них – энергетических показателей – предусматривается гармонический анализ кривых функций F фазных токов I_j и напряжения U_j . При воспроизведении соответствующих процессов эти

кривые получаются в виде массивов из значений $F_{j(n)}$ ($n=1,2,\dots,N_{dt}$) на период T с одинаковым шагом dt . Гармонические составляющие фазных токов и напряжений находятся по формулам:

$$\begin{aligned} F_{A,j(k)} &= \sum_{n=1}^{N_{dt}} F_{j(n)} \cos\left(k2\pi\frac{1}{T}n \cdot dt\right), \\ F_{B,j(k)} &= \sum_{n=1}^{N_{dt}} F_{j(n)} \sin\left(k2\pi\frac{1}{T}n \cdot dt\right). \end{aligned} \quad (20)$$

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 гармоники $K_{\min}=16-20$.

По составляющим A и B вычисляются амплитуды и фазы гармоник:

$$\begin{aligned} F_{\max j(k)} &= \sqrt{F_{A,j(k)}^2 + F_{B,j(k)}^2}, \\ \phi_{j(k)} &= \arctan \frac{F_{A,j(k)}}{F_{B,j(k)}}. \end{aligned} \quad (22)$$

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

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

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

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

Активная и реактивная мощности, потребляемые или отдаваемые СДПМ, находятся по первым гармоническим составляющим фазных токов и напряжений [24]:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{2} \sum_{j=1,2,3} I_{\max j(1)} U_{\max j(1)} \cos(\phi_{Uj(1)} - \phi_{Ij(1)}), \\ Q_1 &= \frac{1}{2} \sum_{j=1,2,3} I_{\max j(1)} U_{\max j(1)} \sin(\phi_{Uj(1)} - \phi_{Ij(1)}). \end{aligned} \quad (25)$$

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

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

где из суммы квадратов амплитуд первых гармоник токов фаз вычтутся 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

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

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:

$$\begin{aligned} k_M &= \frac{P_1}{S_{el}}, \quad k_C = \sqrt{\frac{P_1^2}{P_1^2 + Q_1^2}}, \quad k_2 = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + Q_2^2}}, \\ k_3 &= \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + Q_2^2}}{S_{el}}, \quad \eta = \frac{3r_l I_{eff.l}^2 + h_{emh} \omega_{rp}}{h_{emw} \omega_{rw}}. \end{aligned} \quad (28)$$

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 [21]. Для агрегата приливной электростанции аппроксимируются расходно-напорные характеристики Q - H . Например, в режиме прямого насоса у Вислогубской приливной электростанции мощностью 400 кВт [25, рис. 6.1] семейство характеристик притока воды из моря в бассейн представляется формулой

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

где для мощности значения коэффициентов $q_P = [-50 \ 35 \ -2 \ -5]$ м³/с при мощности 400 кВт, а для меньших мощностей $q_{P(1)}$ значения изменяется от -50 до -32 (рис. 4). На основе аппроксимационных зависимостей типа (29) можно программным путем определять нагрузки силовых элементов.

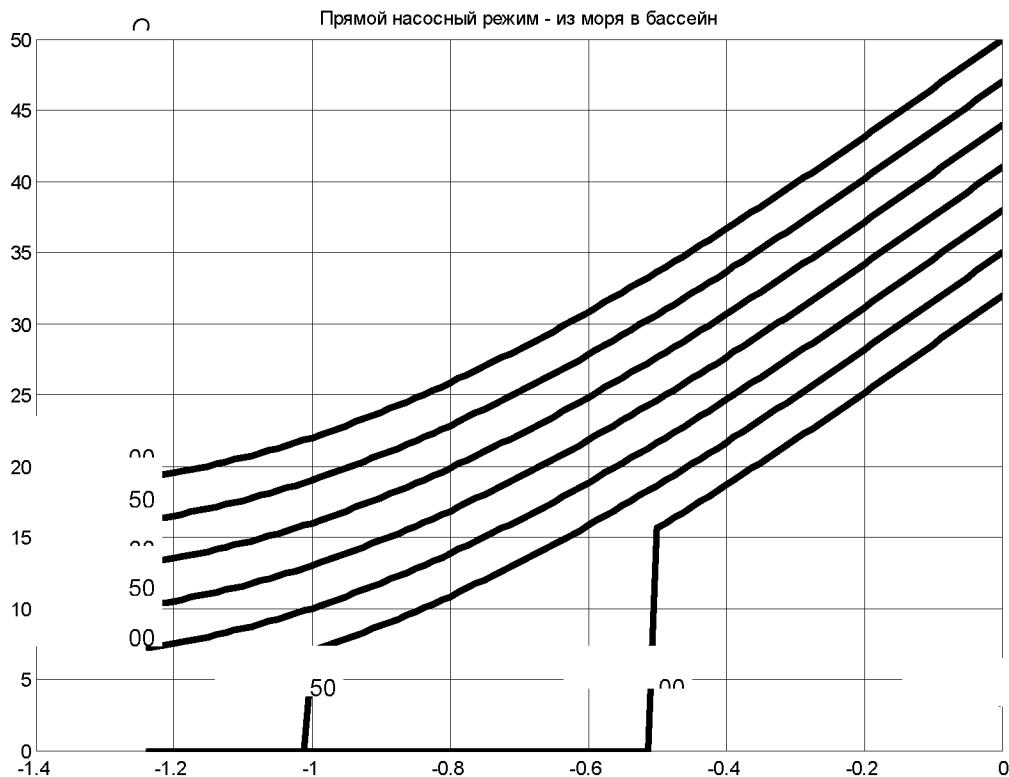


Рис.4. Аппроксимированные расходно-напорные характеристики приливного агрегата Вислогубской ПЭС в режиме прямого насоса

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 м³/с. Для рассматриваемых механизмов характерны кубическая зависимость мощности и квадратичная зависимость момента от частоты вращения. Поэтому с использованием известных номинальных значений частоты ω_{0nom} , и мощности P_{pnom} рассчитываются требуемая синхронная частота вращения ω_0 , определяющая параметры AI_p , и соответствующий ей момент h_p на валу насоса для режима с мощностью P_p :

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

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

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_1		50	Гц
Действующее значение фазного напряжения	U_l		220	В
Действующее значение фазного тока	I_l	$S_l / (3U_l)$	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	ω_B	$2\pi f_1$	314,1593	1/с
Базисный угол поворота	θ_B		1	

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

$$\cos\varphi_l = 0,707 ; z_l = \frac{3U_{noml}^2 \cos\varphi_l}{P_l R_B} = \frac{3 \cdot 0,707 \cdot 220^2}{100 \cdot 10^3 \cdot 0,257} = 4 ; \quad (31)$$

$$r_l = z_l \cos\varphi_l = 2,83 ; l_l = z_l \sin\varphi_l = 2,83 .$$

Фильтр, применяемый в цепи нагрузки, приближенно настроен на погашение 5 - 7 гармоник и имеет параметры в относительных единицах $l_{fl} = 0,286$, $c_{fl} = 3,88$. Воспроизведение статического режима при указанных данных дало сочетание показателей (табл. 3), показывающее 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.

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}
0,22	0,7148	0,709	0,4717	0,408	0,289	0,288	0,236	0,614	0,709	0,8655

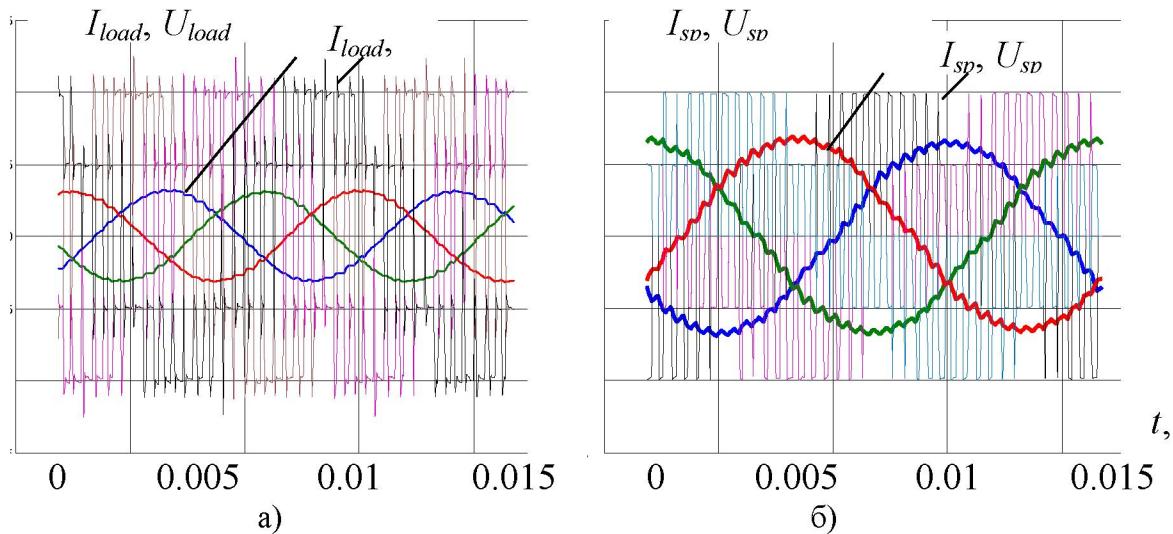


Рис. 5. Расчетные диаграммы токов и напряжений фаз нагрузки перед фильтром (а) и статора машины приливного агрегата в режиме работы двигателем насоса (б)

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

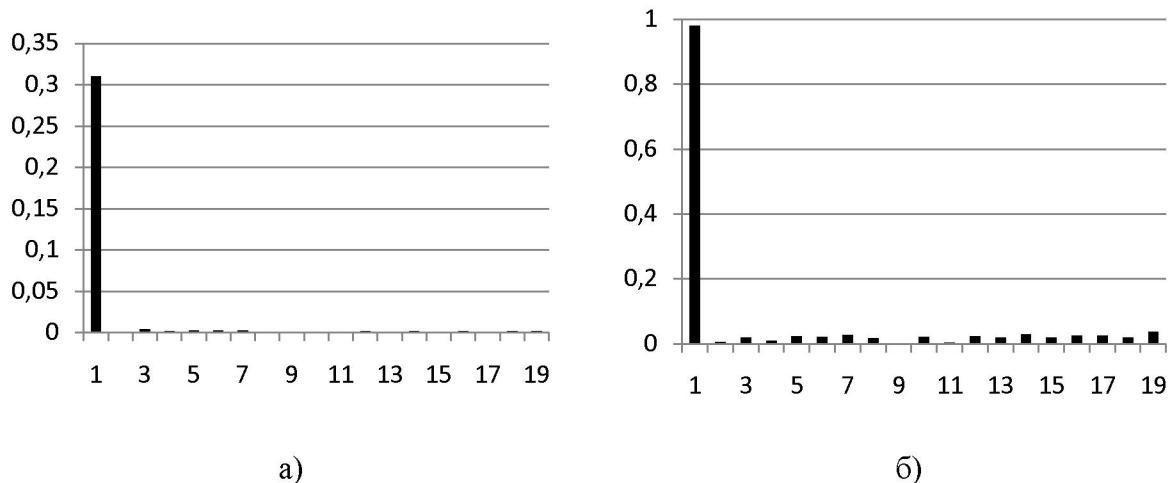


Рис. 6. Расчетные спектры гармоник фазных тока (а) и напряжения (б) нагрузки в статическом режиме в относительных единицах

Выводы

Разработана математическая модель комплекса автономной электростанции, построенной на основе приливного агрегата и использующей другие источники в качестве резервных. Применены эффективные алгоритмы отображения функционирования электромашинных агрегатов в комплекте с силовыми электронными преобразователями параметров электрической энергии.

Показана возможность детального анализа различных режимов работы агрегатов, включая функционирование приливного агрегата турбиной и насосом.

Библиографический список

1. **Twidell, J.** Renewable Energy Resources. Third edition / J. Twidell, T. Weir. - London and New York.: Routledge, 2015. – 784 p.
2. Возобновляемые источники энергии в Российской Федерации и поддержка государства / Е.М. Иванникова [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 17-18. С. 172 - 175.
3. **Ellabba, O.** Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology / O. Ellabba, Abu-Rubb, F. Blaabjerg // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. – V.39. – P. 748-764.
4. REN21 . Renewables 2017 Global Status Report in perspective // Renewable Energy Policy Network for the 21st century, 2017. – 43 p.
5. Draft Ocean Energy Strategic Roadmap Building Ocean Energy For Europe: Ocean Energy Forum. – Brussels, Belgium: Technical Report; European Commission, 2015.
6. **Contestabile, P.** Wave Energy Resource along the Coast of Santa Catarina / V. Ferrante, D. Vicinanza // Energies. – 2015. – № 8 (12). – P. 14219-14243.
7. **Falnes, J.** A review of wave-energy extraction. Johannes Falnes // Marine Structures. – 2007. – V. 20. – Is. 4. – P. 185-201.
8. Tidal Energy: Technology Brief // IRENA Ocean Energy, 2014. – 34 p.
9. **Gorji-Bandpy, M.** Tidal Energy and Main Resources in the Persian Gulf / M. Gorji-Bandpy, M. Azimi, M. Jouya // Distributed Generation and Alternative Energy Journal. – 2013. – V.82. – №2. – P. 61-77.
10. **Kocaman, A.** A stochastic model for a macroscale hybrid renewable energy system / A. Kocaman [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 54. – P. 688–703.
11. **Li, Y.** Design of a high capacity inter-regional transmission overlay for the US / Li Y, JD McCalley / IEEE Trans Power Syst, – 2015. – № 30 (1). – P. 513–521.
12. **Maheshwari, Z.** Smart Integrated Renewable Energy Systems (SIRES): A Novel Approach for Sustainable Development / Z. Maheshwari, R. Ramakumar // Energies. – 2015. – № 30 (1). – P. 313.
13. Assessment of the Joint Development Potential of Wave and Wind Energy in the South China Sea / Y. Wan [et al.] // Energies. – 2018. – №11(2). – P. 398.
14. Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review / Powell K.M. [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 80. P. 215-237.
15. **Renzi, E.** Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean / E. Renzi, F. Dias // European Journal of Mechanics-B/Fluids. – 2013. – № 41. P. 1-10.
16. **Devolder, B.** CFD Simulations of Floating Point Absorber Wave Energy Converter Arrays Subjected to Regular Waves / B. Devolder [et al.] // Energies. – 2018. – № 11 (3). – P. 641.
17. **ShehuSalihu, M.** Power Characteristics Analysis of a Novel Double-Stator Magnetic Geared Permanent Magnet Generator / ShehuSalihu M. [et al.] // Energies. – 2017. – № 10(12). – P. 2048.

18. **Vujacic, M.** Theoretical and Experimental Investigation of Switching Ripple in the DC-Link Voltage of Single-Phase H-Bridge PWM Inverters / M. Vujacic [et al.] // Energies. – 2017. – № 10 (8). – P. 1189.
19. **Bierhoff, M.** DC-link harmonics of three-phase voltage source converters influenced by the pulselwidth-modulation strategy / M. H. Bierhoff, F.W. Fuchs // IEEETrans. Ind. Electron. – 2008. – № 55. – P. 2085–2092.
20. **Байков, А.Б.** Имитационное моделирование ветро-дизельной электростанции / А.И. Байков, А.Б. Дарьенков, Е.Н. Соснина // Электротехника. – 2018. – № 3. С. 26-33.
21. **Saeed Khan, S.** Modeling of MMC for Fast and Accurate Simulation of Electromagnetic Transients: A Review / S.S. Khan, E. Tedeschi // Energies. – 2017. №10. – P. 1161.
22. **Горев, А.А.** Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – Л-М.: ГЭИ, 1950. – 552 с.
23. **Маевский, О.А.** Энергетические показатели вентильных преобразователей / О.М. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
24. Приливные электростанции / Л.Б. Бернштейн [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.