

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Нижний Новгород 2018

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. № 4. – 115 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор А.Б. Лоскутов

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков канд. техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, проф.

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук, доцент

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

гл. редактор выпуска

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук, доцент

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., проф. H-BRS, Германия

Учредитель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала: <https://ie.nntu.ru>

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....	4
Байков А.И., Дарьенков А.Б., Куркин А.А., Соснина Е.Н. Применение математического моделирования для анализа качества электроэнергии, вырабатываемой приливной электростанцией с вспомогательными дизельным и ветровым агрегатами	4
Вялкова С.А., Надтока И.И. Анализ шумовой составляющей суточных графиков активной мощности энергосистемы и метеофакторов при краткосрочном прогнозировании	25
Самоявчев И.С. Оценка экономических показателей проекта применения ОЦР-установок в окрасочных цехах автомобильного производства Горьковского автомобильного завода	35
Серебряков А.С., Осокин В.Л. Определение удаленности места короткого замыкания в электрической сети с двухсторонним питанием.....	43
Фрид С.Е., Лисицкая Н.В. Фотоэлектрические генераторы для горячего водоснабжения.....	52
Кочеганов Д.М., Серебряков А.В. Дифференцирование нагрузки в автономных генераторных комплексах на основе альтернативных источников энергии.....	63
Мещеряков В.Н., Муравьев А.А., Бойков А.И., Пикалов В.В. Система генерирования электроэнергии на базе машины двойного питания.....	72
Терентьев П.В., Филатов Д.А., Браташов Д.Ю. Уточнение коэффициентов использования мощности электрооборудования непромышленных объектов	81
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.....	90
Солнцев Е.Б., Петрицкий С.А., Юртаев С.Н. Разработка имитационной модели тиристорного регулятора напряжения.....	90
Стрелков В.Ф., Андриухин М.В. Система управления электродвигателем вращения антенны РЛС	100
Наши авторы.....	110

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. Алексеева

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 прибоя [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.

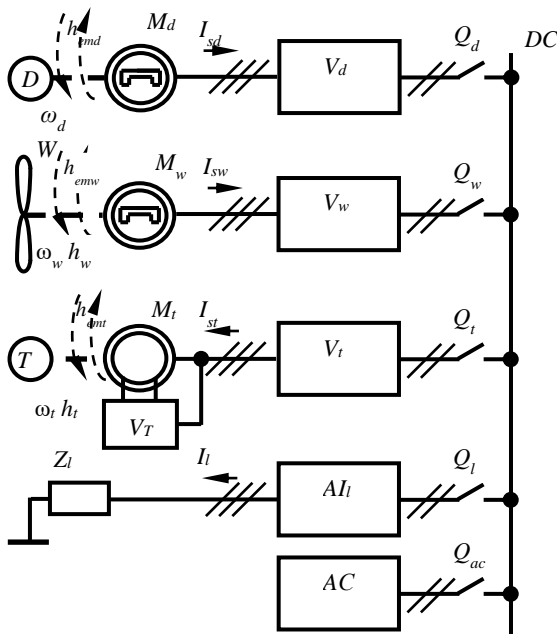


Рис.1. Структурная схема автономной электростанции

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).

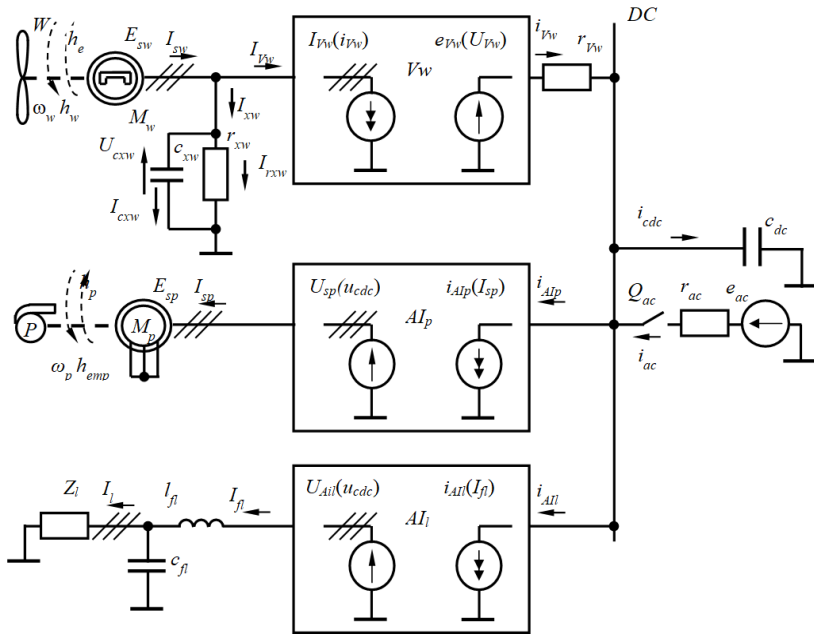


Рис. 2. Расчетная схема автономной электростанции при питании от ветроканала нагрузки и приливного агрегата, работающего в режиме прямого насоса

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 $U_{c_{xw}}$ на входе выпрямителя в пульсирующее напряжение питания цепи постоянного тока:

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

где X_V – топологическая матрица, обеспечивающая вычисление линейных напряжений на выходе трехфазного мостового выпрямителя, j_{\max} – номер строки, соответствующей максимальному значению вектора $X_V \cdot U_{c_{xw}}$. 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:

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

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 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:

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

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

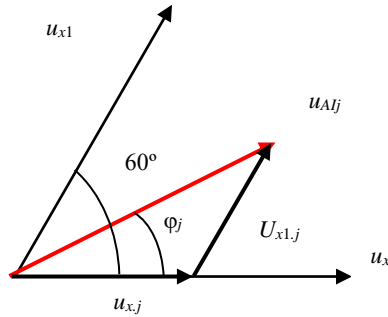


Рис.3. Формирование текущего положения вектора напряжения

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_{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:

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

имеют в качестве независимых переменных: Ψ_{dw} и Ψ_{qw} – потокосцепления двухфазной эквивалентной машины по продольной 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_{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 Ψ_{dqsp} и Ψ_{dqrp} – потокосцепления статора и ротора двухфазной эквивалентной машины M_p по продольной поперечной осям; ω_p и θ_p – частота вращения и угол поворота ротора. Правые части уравнения (15) рассчитываются с использованием (12) и соотношений:

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

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 $r_l - l_l$:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} I_{hl} &= L_{hl}^{-1} \cdot (U_{hcfll} - R_{hl} \cdot I_{hl}); \\
 \frac{d}{dt} I_{All} &= L_{fl}^{-1} \cdot (U_{All} - U_{hcfll} - r_{fl} \cdot I_{All}); \\
 \frac{d}{dt} U_{cfl} &= C_{fl}^{-1} \cdot (I_l - I_{All}),
 \end{aligned} \tag{17}$$

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:

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

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

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

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 гармоник $K_{\min} = 16 \div 20$.

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:

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

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

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

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:

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

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:

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

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 $q_P = [-50, -35, -2, -5]$ м³/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.

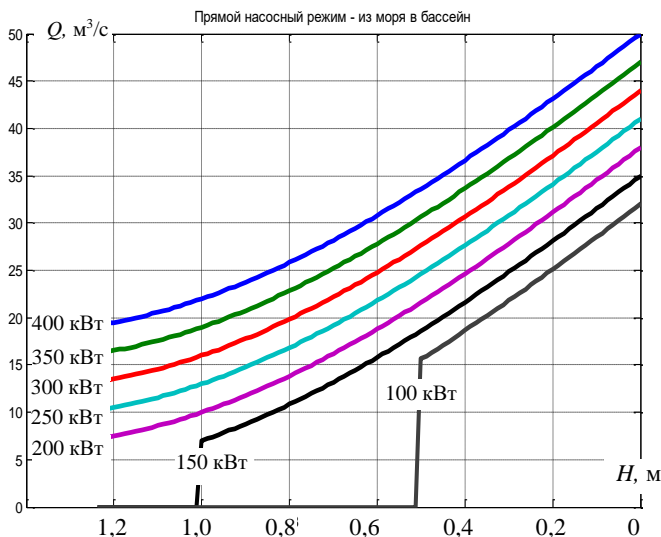


Рис. 4. Аппроксимированные расходно-напорные характеристики приливного агрегата Вислогубской ПЭС в режиме прямого насоса

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 м³/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 $\omega_{номпр}$, 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	ω_B	$2 \cdot \pi \cdot f_l$	314,1593	1/с
Базисный угол поворота	θ_B	–	1	–

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

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

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

Фильтр, применяемый в цепи нагрузки, приближенно настроен на погашение 5-7 гармоник и имеет параметры $L_f = 0,286$, $C_f = 3,88$ 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.

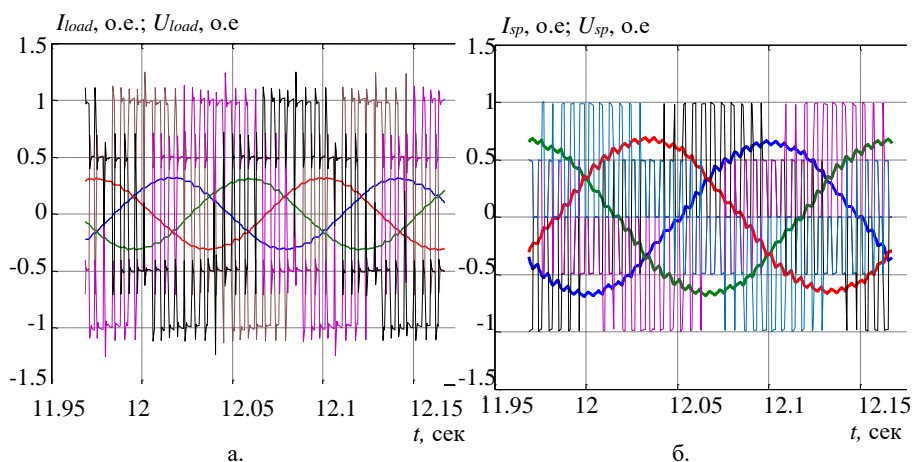


Рис. 5. Расчетные диаграммы токов и напряжений фаз нагрузки перед фильтром (а) и статора машины насосного агрегата в режиме двигателя насоса (б)

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.

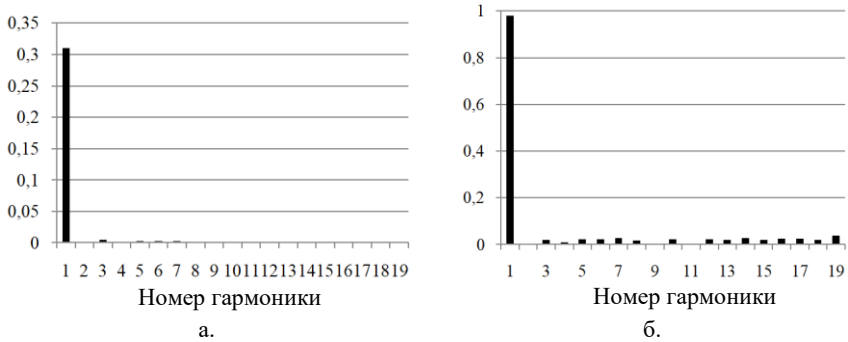


Рис. 6. Расчетные спектры гармоник фазных тока (а) и напряжения (б) нагрузки в статическом режиме в относительных единицах

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 электромашиных 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.

УДК 621.311

С.А. Вялкова, И.И. Надтока

АНАЛИЗ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И МЕТЕОФАКТОРОВ ПРИ КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ

Южно-Российский государственный политехнический университет
(НПИ) им. М.И. Платова

В используемых в настоящее время методах краткосрочного прогнозирования суточных почасовых графиков активной мощности, основанных на ортогональных разложениях временных рядов электропотребления и метеофакторов, не учитываются шумовые составляющие. Анализ и учет информации, содержащейся в шумовых составляющих, в некоторых случаях может повысить точность моделирования и, соответственно, прогнозирования. Для анализа и моделирования временных рядов почасовых значений активной мощности, температуры воздуха и естественной освещенности использован метод сингулярного спектрального анализа, в алгоритме которого предусмотрено выделение трендовых, гармонических и случайных (шумовых) составляющих. Авторами представлены результаты разложения временных рядов электропотребления и метеофакторов для г. Москвы за февраль 2015 года. На их основе получены трендовые, гармонические и шумовые составляющие почасовых графиков активной мощности, температуры воздуха и естественной освещенности. Построены графики автокорреляционных функций шумовых составляющих временных рядов активной мощности, температуры воздуха и естественной освещенности, а также выполнен анализ спектральных плотностей шумовых составляющих. Монотонное уменьшение значений автокорреляционных функций, свидетельствует о стационарности шумовых составляющих.

Определены оценки показателей Херста шумовых составляющих электропотребления, температуры воздуха и естественной освещенности. Из анализа значений показателя Херста следует, что для указанных случайных составляющих наблюдается отсутствие тенденции в сочетании с относительно высоким уровнем зашумленности. Следовательно, необходимы дальнейшие исследования шумовых составляющих активной мощности, температуры воздуха и естественной освещенности на более длительных выборках (2-3 месяца) а также с другими длинами окон.

Ключевые слова: естественная освещенность, метод Херста, прогнозирование электропотребления, сингулярный спектральный анализ, температура воздуха..

1. Введение

Используемые в настоящее время методы краткосрочного прогнозирования суточных графиков мощности энергосистем и энергообъединений, основанные на ортогональных разложениях временных рядов, как правило, не учитывают шумовую составляющую [1-3]. Анализ и учет информации, содержащейся в шумовой составляющей, в некоторых случаях может повысить точность прогнозирования.

В статье рассмотрены вопросы анализа шумовой составляющей в рамках комбинированного подхода к моделированию и прогнозированию нестационарного ряда электропотребления. Подход заключается в применении на этапе моделирования временных рядов ортогонального разложения сингулярного спектрального анализа (SSA – Singular Spectrum Analysis) [4-7] и нечеткой нейронной сети на этапе прогнозирования. При моделировании и краткосрочном прогнозировании суточных графиков активной мощности энергосистем и энергообъединений возникает необходимость проверки выделенной шумовой составляющей ряда активной мощности на наличие в ней трендовых составляющих [8-10]. В данной работе для этих целей применен показатель Херста [11, 12].

II. Моделирование

Исходными данными для анализа и моделирования временных рядов являлись почасовые данные электропотребления территории города Москвы, предоставленные Региональным диспетчерским управлением энергосистемы Москвы и Московской области, филиалом ОАО «СО ЭЭС» (Московское РДУ) [13]. Для анализа и прогноза ряда электропотребления использованы следующие данные за февраль 2015 г.: суточные графики активной мощности $P(t)$, температуры воздуха $\Theta(t)$ и естественной освещенности $E(t)$.

Для моделирования и прогнозирования временного ряда мощности $P(t)$ был применен метод SSA. В результате разложений по методу SSA временные ряды $P(t)$, $\Theta(t)$, $E(t)$ были разделены на трендовые $P_T(t)$, $\Theta_T(t)$, $E_T(t)$ гармонические $P_G(t)$, $\Theta_G(t)$, $E_G(t)$, и случайные (шумовые) $P_{СЛ}(t)$, $\Theta_{СЛ}(t)$, $E_{СЛ}(t)$ аддитивные составляющие:

$$\begin{aligned} P(t) &= P_T(t) + P_G(t) + P_{СЛ}(t); \\ \theta(t) &= \theta_T(t) + \theta_G(t) + \theta_{СЛ}(t); \\ E(t) &= E_T(t) + E_G(t) + E_{СЛ}(t). \end{aligned} \quad (1)$$

На рис. 1 показан пример реализации временного ряда мощности для г. Москвы за период с 1 по 28 февраля 2015 года и его составляющих $P_T(t)$, $P_G(t)$, $P_{СЛ}(t)$. Аналогичные разложения были выполнены для

почасовых графиков температуры $\Theta(t)$ и освещенности $E(t)$. Длина окна была выбрана $L = 24$ час.

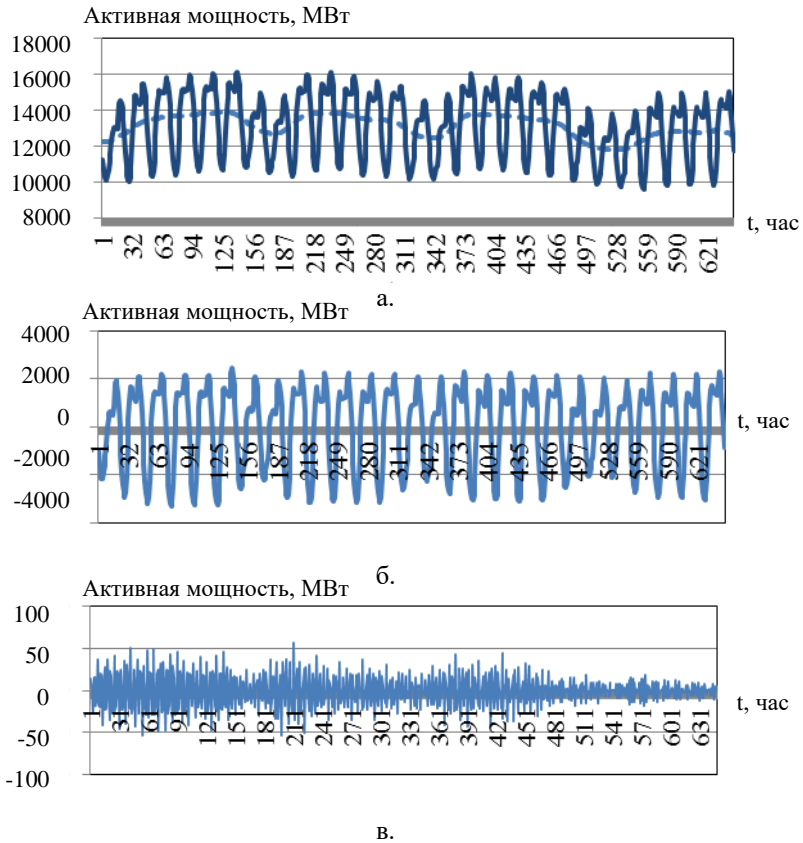


Рис. 1. Почасовые графики за февраль 2015 года:
а) фактической активной мощности и трендовой составляющей (пунктирная линия); б) гармонической составляющей; в) случайной составляющей

III. Результаты

Для выявления тенденций в рядах выделенных шумовых составляющих РСЛ(t), Θ СЛ(t), ЕСЛ(t) были построены графики автокорреляционных функций, определяющих тесноту линейных связей текущего и предыдущего значений ряда. Они использовались для проверки независимости (или, напротив, взаимосвязанности) значений временных рядов случайных составляющих.

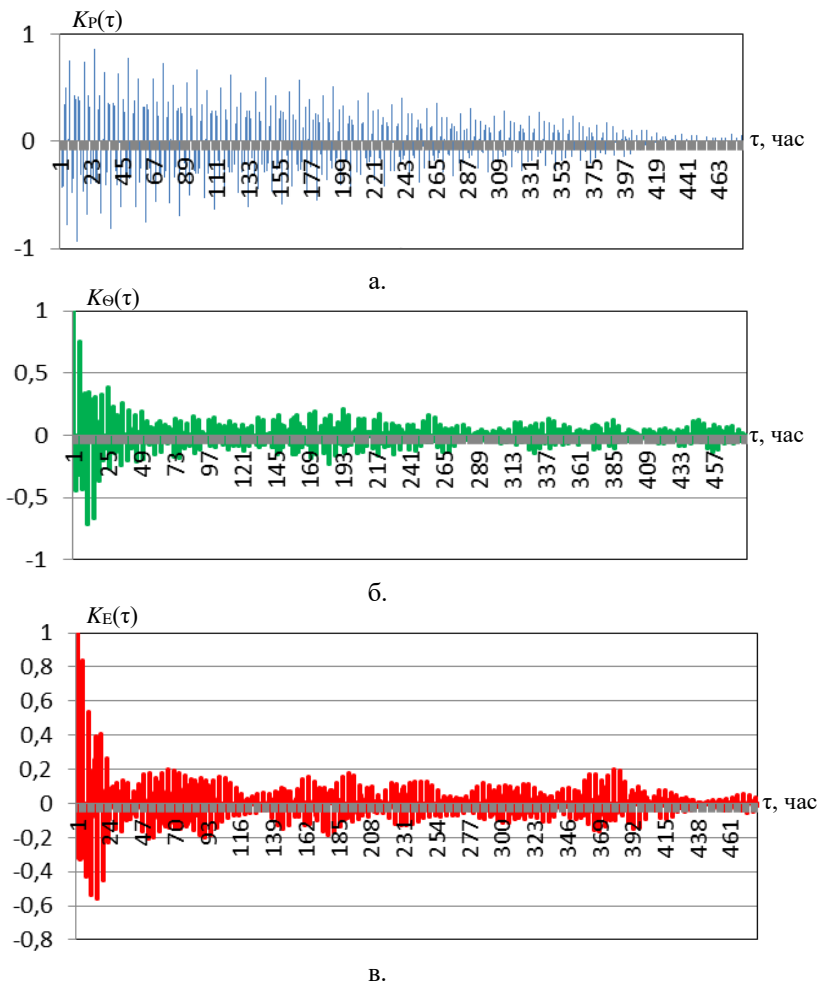


Рис. 2. Графики автокорреляционных функций шумовых составляющих за февраль 2015 года
 а) активной мощности; б) температуры; в) освещенности

Представленные на рис. 2 графики имеют положительную и отрицательную автокорреляцию. Поскольку автокорреляционные функции монотонно убывают, можно сделать вывод о стационарности временного ряда.

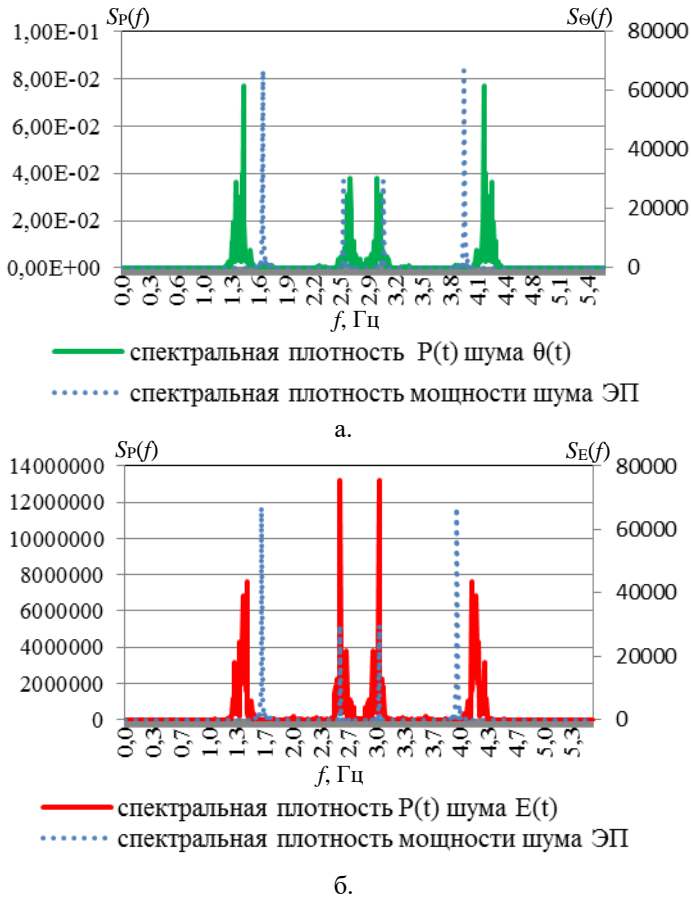


Рис. 3. Графики спектральных плотностей шумовых составляющих за февраль 2015 г:

- а) температуры воздуха и активной мощности;
 б) освещенности и активной мощности

Графики спектральной плотности $S(f)$, представленные на рис. 3, показывают распределение мощности шумовых составляющих по диапазону частот. Чем больше величина $S(f)$, тем меньшие частоты (уже график), представлены в спектральной плотности и тем медленнее изменяется величина шумовой составляющей во времени. Наоборот, чем большие (шире график) частоты представлены в спектральной плотности, тем быстрее происходят изменения шумовой составляющей во времени.

Показатель Херста H характеризует отношение значений тренда к уровню шума [11, 12, 14, 15]. Херст показал, что большинство явлений имеют характер «смещенное случайное блуждание» – тренд с шумом.

Существует несколько методов оценки показателя Херста исходного ряда: а) Истаса и Лэнга – H_1 ; б) порядка вейвлет-преобразованиях – H_2 ; в) метод Фландрена – H_3 [12]. С помощью программного продукта Matlab были найдены оценки для компонент рядов шума РСЛ(t), Θ СЛ(t), ЕСЛ(t), представленные в табл. 1.

Таблица 1.
Показатели Херста шумовых составляющих временных рядов для февраля 2015 года

Величина	Активная мощность $P_{СЛ}(t)$	Температура воздуха $\Theta_{СЛ}(t)$	Освещенность $E_{СЛ}(t)$
H_1	0,13	0,19	-0,06
H_2	-0,09	0,002	-0,21
H_3	-1,05	-1,03	-1,00
Среднее значение шума	0,003427	-0,000044	0,20
Дисперсия шума	356,02	0,001432	226761,46

Когда ряд имеет характер «случайное блуждание», показатель Херста H не должен быть равен 0,5, т.е., в данном случае имеет место отсутствие тренда. Для $0 < H < 0,5$ характерна тенденция в сочетании с относительно высоким уровнем зашумленности. При $0,5 < H < 1$ имеется сохранение наблюдаемой тенденции в сочетании с относительно низким уровнем зашумленности [12]. Так как в исследуемом ряде шумовая составляющая не имеет наклона (рис. 1), то показатель H_3 в дальнейшем анализе не применялся. В данной работе для анализа случайных составляющих РСЛ(t), Θ СЛ(t), ЕСЛ(t) использовался показатель H_1 . Из анализа значений показателя H_1 следует, что в указанных случайных отсутствует тенденция в сочетании с относительно высоким уровнем зашумленности. Показатель H_1 для ряда шума отрицателен благодаря выделенному методом SSA тренду.

IV. Выводы

1. Дальнейшее совершенствование применения метода SSA в краткосрочном прогнозировании электропотребления требует проведения исследования с разными длинами окна $L = 24$ часа, $L = 168$ часов (неделя) и др. для учета суточной и недельной периодичности во временных рядах

активной мощности. Также необходимы испытания нейронных сетей с одинаковой структурой, но с индивидуальными параметрами для каждой составляющей ряда: трендовой $PT(t)$, и гармонической $PG(t)$.

2. С целью выявления условий, при которых могут появляться трендовые составляющие во временных рядах шумовых составляющих, необходимо выполнить аналогичные исследования на более длительных выборках электропотребления и метеофакторов (2-3 месяца), а также с разными длинами окон.

© Вялкова С.А., 2018

© Надтока И.И., 2018

Библиографический список

- [1] Гурский С.К. Адаптивное прогнозирование временных рядов в электроэнергетике. Минск: Наука и техника, 1983. – 271 с.
- [2] Седов А.В., Надтока И.И. Системы контроля, распознавания и прогнозирования электропотребления: модели, методы, алгоритмы и средства. Ростов н/Д.: Рост, 2002. – 320 с.
- [3] Макоклюев Б.И. Анализ и планирование электропотребления. М.: Энергоатомиздат, 2008. – 296 с.
- [4] Александров Ф.И. Выбор параметров при автоматическом выделении трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках подхода «Гусеница» – SSA [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pdmi.ras.ru/~theo/autossa/files/SICPRO2005—paper-Thresholds.pdf> (дата обращения: 02.09.2018).
- [5] Александров Ф.И., Голяндина Н.Э. Автоматическое выделение и прогнозирование временных рядов методом SSA // V Санкт-Петербургская конференция по Моделированию, 26 июня – 2 июля 2005 года, Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный университет, 2005. С. 45-50.
- [6] Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» – SSA: прогноз временных рядов, учеб. пособие. СПб: СПбГУ, 2004. – 52 с.
- [7] Голяндина Н.Э., Некрулин В.А. Жиглавский А.А. Сингулярный спектральный анализ для временных рядов [Электронный ресурс]. (дата обращения: 02.09.2018).
- [8] Надтока И.И., Корнюкова О.А. Адаптация метода сингулярного спектрального анализа для прогнозирования временных рядов электропотребления // Известия вузов Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2008. № 3. С. 88-90.
- [9] Вялкова С.А., Поддубская С.С., Куприянова М.А., Корнюкова О.А. Применение одномерного гусеничного метода для моделирования графиков суточной нагрузки на примере Ростовской области // Сборник работ победителей отборочного тура Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по

- нескольким междисциплинарным направлениям (Эврика 2011), окт. – нояб. 2011, Новочеркасск, Россия, Юж. – Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). С. 297-299.
- [10] Надтока И.И., Вялкова С.А., Корнюкова О.А. Сравнительный анализ методов одномерного и многомерного спектрального анализа при очистке от шумовой составляющей временного ряда электропотребления 2012 – 2013 годов // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды IV Междунар. науч.-техн. конф. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2013. С. 194-197.
- [11] Колпач Д.М. Исследование области применения критерия Херста. [Электронный ресурс]. URL: <http://stud.reflexivity.ru/Herst07.pdf> (дата обращения: 02.09.2018).
- [12] А. А. Пучков. Прогнозируемость фондовых индексов с помощью константы Херста [Электронный ресурс]. URL: <http://jurnal.org/articles/2011/ekon27.html> (дата обращения: 02.09.2018).
- [13] Системный оператор Единой Энергетической Системы: Электронный ресурс. [Электронный ресурс]. URL: <https://so-ups.ru/> (дата обращения: 02.09.2018).
- [14] Солнцев Л.А., Иудин Д.И., Снегирева М.С. Фрактальный анализ векового хода средней температуры воздуха в г. Нижнем Новгороде // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2007. № 4. С. 88-91.
- [15] Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M. Long – term storage: An experimental study. L.: Constable, 1965.

S.A. Vyalkova, I.I. Nadtoka

ANALYSIS OF THE NOISE COMPONENT OF THE DAILY SCHEDULES OF ACTIVE POWER ENERGY SYSTEMS AND METEOFACTORS AT SHORT-TERM FORECASTING

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk, Russia

Abstract. It is shown that in the currently used methods of short-term forecasting of daily hourly active power graphs based on orthogonal expansions of the time series of power consumption and meteorological factors, noise components are not taken into account. Analysis and accounting of information contained in the noise components in some cases, can improve the accuracy of modeling and, accordingly, prediction.

In the article, the method of singular spectral analysis was used for the analysis and modeling of time series of hourly values of active power, air temperature and natural light, the algorithm of which provides for the allocation of trend, harmonic and random (noise) components.

The results of the decomposition of the time series of power consumption and meteorological factors for Moscow in February 2015 are presented, the results of which are used to obtain trend, harmonic and noise components of hourly graphs of active power, air temperature and natural light. The graphs of the autocorrelation functions of the

noise components of the time series of active power, air temperature and natural illumination were constructed, and the spectral densities of the noise components were also analyzed. The monotonic decrease in the values of autocorrelation functions indicates the stationarity of the noise components.

Estimates of the Hurst indicators of the noise components of electrical consumption, air temperature and natural light are determined. From the analysis of the values of the indicator. Hurst follows that in these random components there is a lack of trend in combination with a relatively high level of noise. The conclusion was made about the need for further studies of the noise components of active power, air temperature and natural light on longer samples (2-3 months) as well as with other window lengths.

Keywords: air temperature, Hurst's method, natural light, power consumption prediction, singular spectral analysis.

References

- [1] S.K. Gursky, Adaptive time series forecasting in the power industry. Minsk: Science and Technology, 1983.
- [2] A.V. Sedov and I.I. Nadtok, Control systems, recognition and prediction of power consumption: models, methods, algorithms and tools. Rostov-at-Don: Rost, 2002.
- [3] B.I. Makoklyuev, Analysis and planning of power consumption. Moscow: Energoatomizdat, 2008.
- [4] F.I. Alexandrov, «The choice of parameters for the automatic allocation of trend and periodic components of the time series in the framework of the «Caterpillar» approach – SSA» [Online]. Available at: <http://www.pdmi.ras.ru/~theo/autossa/files/SICPRO2005-paper-Thresholds.pdf> [Accessed at: Feb. 9, 2018].
- [5] F.I. Aleksandrov and N.E. Goljandina, «Automatic selection and forecasting of time series using the CCA method», V St. Petersburg Conference on Modeling, June 26 – July 2, 2005, St. Petersburg, Russia, St. Petersburg State University, 2005, pp. 45-50.
- [6] N.E. Goljandina, The Caterpillar Method – SSA: Time Series Forecast. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2004.
- [7] N.E. Goljandina, V.A. Nekrulin and A.A. Zhiglavsky, «Singular spectral analysis for time series». [Online]. [Accessed at: Feb. 9, 2018].
- [8] I.I. Nadtoka and O.A. Korniyukova, «Adaptation of the method of singular spectral analysis to predict the time series of power consumption», University news. North-Caucasian region. Technical sciences series, no. 3, pp. 88-90, 2008.
- [9] S.A. Vyalkova, S.S. Poddubskaya, M.A. Kupriyanova and O.A. Korniyukova, «Application of the one-dimensional caterpillar method for modeling daily load graphs on the example of the Rostov region», Collection of works by the winners of the qualifying round of the All-Russian competition of research works of students, graduate students and young scientists in several interdisciplinary areas (Evrika 2011), Novocherkassk, Russia, pp. 297-299, Oct.-Nov. 2011.
- [10] I.I. Nadtok, S.A. Vyalkova and O.A. Korniyukova, «Comparative analysis of the methods of one-dimensional and multidimensional spectral analysis during the cleaning of the noise component of the time series of power consumption 2012-2013», Power industry through the eyes of young people: scientific works of the IV

- International. scientific and technical conf. Novocherkassk: YuSGTU, pp. 194-197, 2013.
- [11] D.M. Korpach, «Study the scope of the Hurst criterion». [Online]. Available at: <http://stud.reflexivity.ru/Herst07.pdf> [Accessed at: Feb. 9, 2018].
- [12] A.A. Puchkov, «Predictability of stock indices using the Hurst constant» [Online]. Available at: <http://jurnal.org/articles/2011/ekon27.html> [Accessed at: Feb. 9, 2018].
- [13] «System Operator of the Unified Energy System: Electronic Resource». [Online]. Available at: <https://so-ups.ru/> [Accessed at: Feb. 9, 2018].
- [14] L.A. Solntsev, D.I. Iudin and M.S. Snegireva, «Fractal analysis of the secular variation of average air temperature in Nizhny Novgorod», Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod, vol. 4, pp. 88-91, 2007.
- [15] H.E. Hurst, R.P. Black and Y.M. Simaika. Long-term storage: An experimental study. L.: Constable, 1965.

УДК 621.175

И.С. Самоявчев

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ ОЦР-УСТАНОВОК В ОКРАСОЧНЫХ ЦЕХАХ АВТОМОБИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ГОРЬКОВСКОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ЗАВОДА

Автомобильный завод «ГАЗ»

Вторичное использование тепла для получения электрической и тепловой энергии на промышленных объектах является актуальным направлением экономии энергетических ресурсов. Статья посвящена вопросам повышения энергетической эффективности автомобильных производств за счет рекуперации электрической и тепловой энергии с помощью установок на основе органического цикла Ренкина (ОЦР). Приведено описание принципа действия ОЦР-установок и технологии их использования для рекуперации электрической и тепловой энергии. Показано, что в электроэнергию может быть преобразовано до 20% переданной ОЦР-установке тепловой энергии. Проведен анализ параметров, от которых зависит КПД ОЦР-установки по выработке электроэнергии. Выделено оборудование, которое может использоваться в качестве потребителей рекуперированной энергии. На примере двух окрасочных цехов автомобильного производства выполнена оценка экономических показателей проектов внедрения ОЦР-установки. Для исследуемых цехов срок окупаемости проектов получился 10 и 16 лет. Рассмотрены аспекты повышения экономической эффективности применения ОЦР-установок.

Ключевые слова: автомобильное производство, окрасочный цех, органический цикл Ренкина, рекуперация энергии, ресурсосбережение, срок окупаемости, энергетическая эффективность.

1. Введение

Актуальным направлением повышения эффективности использования энергоресурсов на промышленных объектах (окрасочные цеха, сталелитейные производства, термическая обработка стали, цементные заводы и пр.) является вторичное использование низкопотенциальных тепловых выбросов.

Промышленные предприятия выбрасывают в окружающую среду большое количество тепловой энергии вместе с потоками продуктов сгорания и охлаждающей жидкости при относительно низкой температуре. Это крайне неблагоприятно воздействует на окружающую среду, загрязняя ее и приводя к изменениям климата. Кроме того, стоимость выброшенной

энергии в конечном счете закладывается в себестоимость продукции. Поэтому в последнее время прилагаются большие усилия по утилизации тепловых отходов предприятий промышленности, с возможностью генерации электроэнергии [1].

II. Цикл Ренкина

Для утилизации низкопотенциальной энергии все чаще применяется цикл Ренкина с альтернативными рабочими телами, в качестве которых обычно используются органические вещества (класс соединений, в состав которых входит углерод, за исключением карбидов, карбонатов, оксидов углерода и цианидов), с более низкой, чем у воды, температурой кипения. Благодаря этому появляется возможность реализации цикла Ренкина при более низкой температуре. Соответствующий цикл получил название органический цикл Ренкина (Organic Rankine Cycle – ОЦР). Принято считать, что источник энергии является низкопотенциальным, если его температура не превышает 500-570 К (230-300°C).

Рабочим телом в ОЦР является вещество, имеющее более низкую, чем у воды, температуру кипения. Благодаря этому испарение рабочего тела происходит при относительно низкой температуре, что и позволяет утилизировать низкопотенциальную энергию. На рис. 1 приведены две схемы, иллюстрирующие принцип работы ОЦР-установки. На рис. 1, а изображена схема ОЦР без регенератора, на рис. 1, б – схема ОЦР с регенератором.

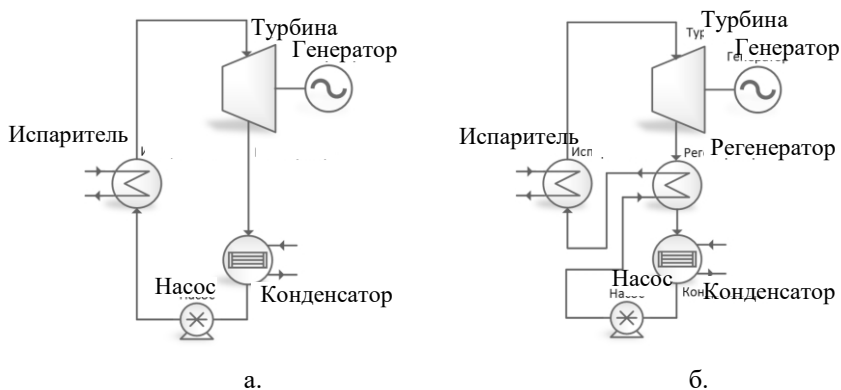


Рис.1. Схема ОЦР-установки:
(а) без регенератора; (б) с регенератором

Принцип работы установки следующий. В схеме на рис. 1(а) насос закачивает рабочее тело в жидком состоянии в теплообменник-испаритель,

где при высоком давлении оно испаряется. Далее пар попадает в турбину, в которой, расширяясь, он совершает работу. Вал турбины вращается и приводит в действие генератор. Отработанный пар охлаждается, и рабочее тело конденсируется. Далее, вещество в жидком состоянии попадает в насос и цикл замыкается. В схеме на рис. 1(б) рабочее тело на выходе из турбины попадает в регенератор, где отдает часть тепловой энергии сжатой жидкости, которая направляется в испаритель.

Тепловая энергия в ОЦР-установках может переноситься от источника теплоты к рабочему телу с использованием промежуточного теплоносителя, в качестве которого обычно применяется термальное масло. Использование промежуточного теплоносителя позволяет избежать локального перегрева рабочего тела.

При наличии больших потоков энергии в ОЦР эффективнее использование турбины, если потоки энергии невелики, предпочтительнее использовать поршневой детандер. Кроме того, поршневые детандеры более приспособлены для работы в условиях флуктуаций тепловых потоков от внешнего источника теплоты.

На рис. 2 представлен общий вид ОЦР-установки. На рис. 3 показана схема потоков энергии от источника бросового тепла к ОЦР-установке и к потребителям.

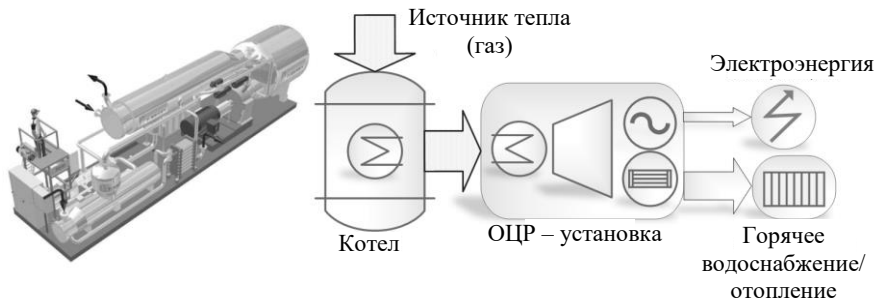


Рис.2. Рекуперация тепловой энергии с помощью ОЦР-установки

Из приведенной диаграммы следует, что 20% тепловой энергии, переданной ОЦР-установке, может быть преобразовано в электроэнергию, а 80% энергии остается в виде тепла и может быть использовано для отопления или горячего водоснабжения. Таким образом, целесообразность применения ОЦР-установок значительно выше там, где существует стабильное потребление тепловой энергии.

Суммарная электрическая мощность всех электростанций на территории РФ составляла 225 ГВт, а суммарная тепловая мощность – 270,8 тыс. Гкал/ч (315 ГВт). Отношение суммарной установленной тепловой мощности к суммарной электрической составляет 1,4.

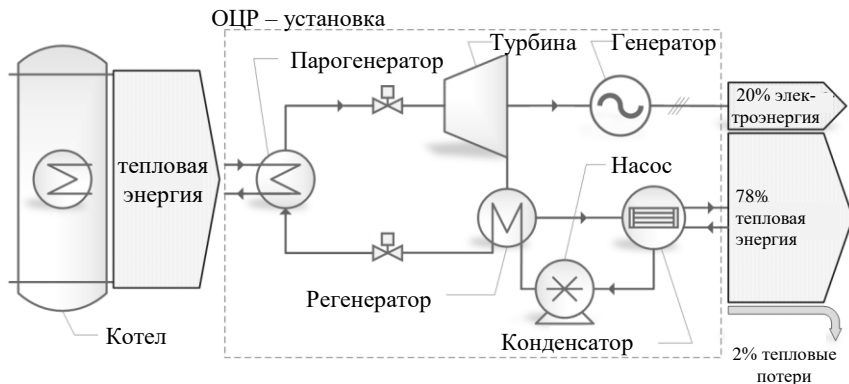


Рис.3. Энергетическая диаграмма ОЦР-установки

III. Расчетные параметры

Агентство энергетической информации США (EIA) выделило энергосистему Российской Федерации как наиболее перспективную для развития когенерации. Ее доля в производстве электроэнергии в РФ к 2030 году может вырасти до 43 %. Наличие большой тепловой нагрузки на территории РФ определяет столь высокий потенциал развития малой энергетики на базе когенерационных установок [4].

В действительности КПД ОЦР-установки по выработке электроэнергии зависит от множества параметров. В табл. 1 приведена зависимость КПД ОЦР-установок от температуры бросового тепла и охладителя [5].

Для определения количества электроэнергии, которое может быть рекуперировано ОЦР-установкой, рассчитывается количество утилизируемого тепла [2]:

$$Q_{\text{в}}^{\text{а}} = L \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{in}} - t_{\text{out}}), \quad (1)$$

где L – расход воздуха; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха; $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха; t_{in} – температура на входе ОЦР – установки; t_{out} – температура на выходе ОЦР-установки.

Таблица 1.
КПД ОЦР-установок

Температура бросового тепла, °С	Температура бросового тепла, °F	Температура охладителя, °С	Температура охладителя, °F	КПД Цикла Карно ОЦР-установки, %	КПД ОЦР-установки, %
<38	<100	49	120	-	-
38-93	100-200			12,0	4,0
93-149	200-300			24,4	8,1
149-204	300-400			33,7	11,2
204-260	400-500			41,0	13,7
260-316	500-600			46,8	15,6
316-371	600-700			51,6	17,2
371-427	700-800			55,6	18,5
427-482	800-900			59,0	19,7
482-538	900-1000			61,9	20,6
538-593	1000-1100			64,5	21,5

Таблица 2.
Расчет количества утилизируемого тепла

№ п.п.	Параметр	Цех окраски	
		№1	№2
1	Температура воздуха на выходе из трубы (t_{in}), °С	175	205
2	Температура воздуха на выходе ОЦР-установки (t_{out}), °С	20	20
3	Объем выбрасываемого воздуха (L), м ³ /ч	47043	31320
4	Удельная теплоемкость воздуха (c_v), Вт/(кг·град)	0,279	0,279
5	Плотность воздуха (ρ_v), кг/м ³	0,79	0,79
6	Количество утилизируемой тепловой энергии Q^v , МВт	1,6	1,3
7	Электрический КПД, %	11,2	11,2
8	Электрическая мощность ОЦР-установки, МВт	0,18	0,15

На основании данных из табл. 1, 2 может быть определено количество электрической и тепловой энергии, рекуперированной ОЦР-установкой, а также произведен расчет суммарной годовой экономии от утилизации бросового тепла (табл. 3).

Учитывая нестабильность и относительно малую мощность потока бросового тепла, потребители рекуперированной энергии могут использовать оборудование, не задействованное в технологическом процессе: освещение или горячее водоснабжение.

Таблица 3.
КПД ОЦР-установок

№ п.п.	Параметр	Цех окраски	
		№ 1	№ 2
1	Наработка установки, ч/год	4000	4000
2	Электрическая мощность установки, МВт	0,18	0,15
3	Потребляемая электрическая мощность на освещение, МВт	1,15	0,57
4	Тепловая мощность установки, МВт	1,28	1,02
5	Выработка электроэнергии, МВт·ч/год	718	571
6	Стоимость электроэнергии, руб/МВт·ч	4500	4500
7	Экономия от выработанной электроэнергии, млн. руб/год	3,23	2,57
8	Выработка тепловой энергии для ГВС, МВт·ч/год	5132	4078
9	Потребление тепловой энергии на ГВС, МВт·ч/год	1858	300
10	Стоимость тепловой энергии для ГВС, руб/МВт·ч	976	976
11	Экономия от выработанной тепловой энергии, млн руб/год	1,8	0,3
12	Суммарная экономия, млн. руб	5,03	2,87

Как видно из табл. 3, потребление тепловой энергии на горячее водоснабжение в исследуемых цехах значительно меньше вырабатываемого ОЦР-установкой тепла. При этом потребляемая в цехах мощность на освещение в несколько раз превышает мощность ОЦР-установки. Таким образом, реальная экономия от использования ОЦР-установки будет зависеть от инфраструктурных особенностей промышленного объекта, технической возможности и количественных показателей потребления электро- и тепловой энергии. На основании полученных данных по годовой экономии от вырабатываемой электро- и тепловой энергии, может быть определен период окупаемости ОЦР-установки. Оценка удельных капитальных затрат на киловатт электрической мощности (ОЦР-установка, монтажные работы, теплообменник) в зависимости от электрической мощности ОЦР-установки приведен в табл. 4 [3].

Таблица 4.
Удельные капитальные затраты

	Электрическая мощность ОЦР-установки				
	50-500 кВт	500-1000 кВт	1-5 МВт	5-20 МВт	>20 МВт
Удельные капитальные затраты*, руб./кВт	301500	268000	201000	167500	140700

* Примечание: исходные данные [5] приведены в долларовом выражении, при переводе курс доллара принят 67 руб.

Таблица 5.
Период окупаемости ОЦР-установки

	Параметр	Цех окраски	
		№ 1	№ 2
1	Экономия от выработанной эл.энергии, млн руб./год	3,23	2,57
2	Экономия от выработанной тепловой энергии, млн. руб./год	1,8	0,3
3	Стоимость технического обслуживания*, млн. руб./год	0,45	0,45
4	Суммарная экономия, млн. руб.	4,6	2,4
5	Расчетная (электрическая) мощность ОЦР-установки, кВт	180	150
6	Удельные капитальные затраты, руб./кВт	261000	261000
7	Капитальные затраты, млн. руб.	46,98	39,15
8	Период окупаемости, лет	10	16

* Примечание: средняя стоимость обслуживания ОЦР-установок на типовых промышленных объектах [3].

IV. Заключение

Согласно произведенным расчетам (табл. 5), период окупаемости для исследуемых цехов № 1 и № 2 составил 10 и 16 лет соответственно. Как было показано выше, удельные капитальные затраты зависят от мощности ОЦР-установки и тем выше, чем меньше объем бросового тепла. Кроме того, важным фактором при оценке целесообразности использования являются инфраструктурные особенности промышленного объекта, которые будут определять техническую возможность и объем потребления электрической и тепловой энергии.

© Самоявчев И.С., 2018

Библиографический список

- [1] Белов Г.В., Дорохова М. А. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 2. С. 99-124.
- [2] Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С., Пророкова М.В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2013. – 124 с.
- [3] Vescovo R. ORC recovering industrial heat. Turboden. Cogeneration and On-Site Power Production, 2009.
- [4] Михеев Д.В., Шабалин И.С. Экономические перспективы развития малой энергетики РФ на основе когенерационного оборудования // Актуальные вопросы современной науки. 2014. № 31. С. 237-249.

- [5] Elson A., Tidball R., Hampson A. Waste heat to power market assessment. ICF International, March 2015. – 86 p.

I.S. Samoyavchev

**ESTIMATION OF ECONOMIC INDICATORS
OF THE PROJECT OF APPLICATION
OF CRO-INSTALLATIONS IN THE PAINT PLANTS
OF GORKY AUTOMOBILE PLANT**

GAZ international LCC,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Recycling of heat to generate electricity and heat at industrial facilities is an important direction of saving energy resources. The article is devoted to the issues of increasing the energy efficiency of automotive production through the recovery of electrical and thermal energy using installations based on the organic Rankine cycle (ORC). The description of the principle of operation of the ORC facility and the technology of their use for the recovery of electrical and thermal energy is given. It is shown that up to 20% of the thermal energy transferred to the ORC facility can be converted into electricity. The analysis of the parameters that determine the efficiency of the ORC facility for the generation of electricity. Allocated equipment that can be used as consumers of recovered energy. An assessment of the economic performance of projects for the introduction of a ORC facility was carried out on the example of two paint shops of automobile production. The project payback period was 10 and 16 years for paint shops studied. The aspects of improving the ORC facility economic efficiency were considered.

Keywords: automobile production, energy efficiency, energy recovery, organic Rankine cycle, paint shop, payback period, resource saving.

References

- [1] G.V. Belov and M.A. Dorokhova. Organic Rankine cycle and its use in alternative energy // Science and Education of Bauman MSTU, vol. 2, pp. 99-124, 2014.
- [2] V.V. Bukhmirov, D.V. Rakutina, Yu.S. Solnyshkova and M.V. Prorokova, Thermal calculation of recuperative heat exchanger. Ivanovo: Ivanovo State Energy University n.a. V.I. Lenin, 2013.
- [3] R. Vescovo, ORC recovering industrial heat. Turboden. Cogeneration and On-Site Power Production, 2009.
- [4] D.V. Mikheev and I.S. Shabalin. Economic prospects for the development of small energy of the Russian Federation on the basis of cogeneration equipment // Actual issues of modern science, vol. 31, pp. 237-249, 2014.
- [5] A. Elson, R. Tidball and A. Hampson, Waste heat to power market assessment. ICF International, March 2015.

УДК 621.3.064.1**А.С. Серебряков, В.Л. Осокин****ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАЛЕННОСТИ МЕСТА КОРОТКОГО
ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ
С ДВУХСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ**

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Статья посвящена вопросам определения удаленности места короткого замыкания в электротехническом комплексе с двухсторонним питанием. Высокая точность определения места повреждения позволяет сократить перерывы в электроснабжении потребителей и уменьшить ущерб от короткого замыкания. Авторами предложен метод определения удаленности места короткого замыкания в межподстанционной зоне тяговой сети однопутного участка железной дороги, электрифицированной на переменном токе. Алгоритм расчета исключает погрешность от влияния возникшей в месте короткого замыкания электрической дуги или переходного сопротивления. Метод рассмотрен на примере двух смежных подстанций электрифицированного участка, получающих питание от одной системы внешнего электроснабжения. Подстанции имеют такое взаимное сопротивление, что потребляемый при коротком замыкании ток одной подстанции влияет на значение тока другой подстанции. Показано, что при определении удаленности короткого замыкания с помощью предложенного метода взаимное сопротивление и наличие переходного сопротивления и электрической дуги в месте короткого замыкания не оказывают влияния на точность определения удаленности короткого замыкания.

Ключевые слова: аварийный режим, двухстороннее питание, сопротивление петли, тяговая сеть электрифицированной железной дороги, удаленность короткого замыкания.

1. Введение

При коротких замыканиях в электрической сети весьма важным является вопрос, как в наиболее короткий срок точно определить место повреждения. Существующие методы определения удаленности места повреждения от питающей подстанции основаны на анализе параметров аварийного режима, которые несут в себе информацию об удаленности места короткого замыкания [1, 2].

Удаленность места короткого замыкания (КЗ) в электрической сети можно определить по указанным выше методам следующим образом. В момент КЗ в сети приборы, установленные на подстанциях, измеряют параметры аварийного режима (в том числе ток фидера и напряжение на ши-

нах подстанции), на основании которых делается заключение об удаленности места КЗ от подстанции. Определение удаленности места КЗ в общем виде, например, при двух односторонних петлевых схемах питания двухпутных участков или при двухстороннем питании однопутного участка, основано на вычислении модуля входного сопротивления Z_K петли КЗ относительно шин ближайшей к месту КЗ подстанции по формуле:

$$Z_K = \frac{U_{ш}}{I_{кф}}, \quad (1)$$

где $U_{ш}$ – напряжение на шинах подстанции в момент КЗ; $I_{кф}$ – ток фидера сети, где произошло КЗ.

Расстояние L_K от подстанции до места КЗ определяется по формуле:

$$L_K = \frac{Z_K}{z_C}, \quad (2)$$

где z_C – модуль удельного (погонного) сопротивления сети.

Недостатком этого метода, называемого методом Z , и недостатком устройства на его основе является низкая точность определения удаленности места КЗ. При глухом (металлическом) КЗ погрешность составляет 400 – 500 м, а при КЗ через переходное сопротивление погрешность может увеличиться до 2-4 км.

При определении удаленности места короткого замыкания в электрической сети с двухсторонним питанием по раздельной, узловой или параллельной схемам, более точным является метод двухстороннего измерения токов. При этом методе в момент короткого замыкания измеряют ток $I_{КА}$ одной подстанции A и ток $I_{КВ}$ второй (смежной) подстанции B . Затем вычисляют отношение $I_{КА}/(I_{КА}+I_{КВ})$ или $I_{КВ}/(I_{КА}+I_{КВ})$, по значению которого судят об удаленности места короткого замыкания.

Однако при КЗ через переходное сопротивление $R_{П}$ или сопротивление дуги $R_{Д}$ при двухстороннем питании электрической сети, падение напряжения на переходном сопротивлении или на сопротивлении дуги определяется не только током поврежденного фидера, но и током смежной подстанции. Измерители параметров КЗ на поврежденном фидере воспринимают это явление как возрастание сопротивления петли короткого замыкания Z_K , что и увеличивает погрешность определения расстояния от подстанции до места повреждения.

II. Цели и задачи исследования

Целью предлагаемой статьи и техническим результатом при реализации ее основных положений является повышение точности определения расстояния до места повреждения при двухстороннем измерении токов смежных подстанций. Повышение точности определения удаленности места КЗ достигается за счет учета связи подстанций по линиям электропередачи системы внешнего электроснабжения и предложенного алгоритма расчета удаленности места повреждения, исключающего погрешность от влияния возникшей в месте КЗ электрической дуги или переходного сопротивления.

III. Материалы и методы

Рассмотрим основные положения метода на примере тяговой сети однопутного участка электрифицированной железной дороги переменного тока с двухсторонним питанием межподстанционной зоны. В руководящих указаниях по релейной защите систем тягового электроснабжения [3, 4] смежные подстанции *A* и *B*, питающие межподстанционную зону, представляются как независимые и не связанные между собой источника напряжения. В статье 2013 г. показано, что в действительности питание обеих подстанций *A* и *B* осуществляется от одной и той же энергетической системы (системы внешнего электроснабжения) [5]. Поэтому в схеме двухстороннего питания межподстанционной зоны будем указывать только один общий источник питания. Как показано в работах Л.А.Германа, при этом снижается погрешность расчета токов короткого замыкания в тяговой сети [5, 6]. Одновременно с этим уменьшается и погрешность при определении удаленности места КЗ.

Принципиальная схема и схема замещения тяговой электрической сети однопутного участка с двухсторонним питанием от одной системы внешнего электроснабжения приведены на рис. 1.

Сопротивления Z_{TA} и Z_{TB} берутся из паспортов тяговых трансформаторов. Сопротивления Z_{AB} , Z_A и Z_B задаются энергоснабжающей организацией или определяются из трех опытов коротких замыканий на шинах подстанций *A* и *B*. При экспериментальном определении параметров введем дополнительно следующие обозначения: $Z_{ПА} = Z_A + Z_{TA}$ и $Z_{ПВ} = Z_B + Z_{TB}$ – сопротивления подстанций *A* и *B*. Тогда для определения указанных выше параметров составим три следующих уравнения:

$$\begin{aligned} Z_{AB} + Z_{ПА} &= \frac{U_0}{I_{KA(A)}}; \\ Z_{AB} + Z_{ПВ} &= \frac{U_0}{I_{KB(B)}}; \end{aligned} \quad (3)$$

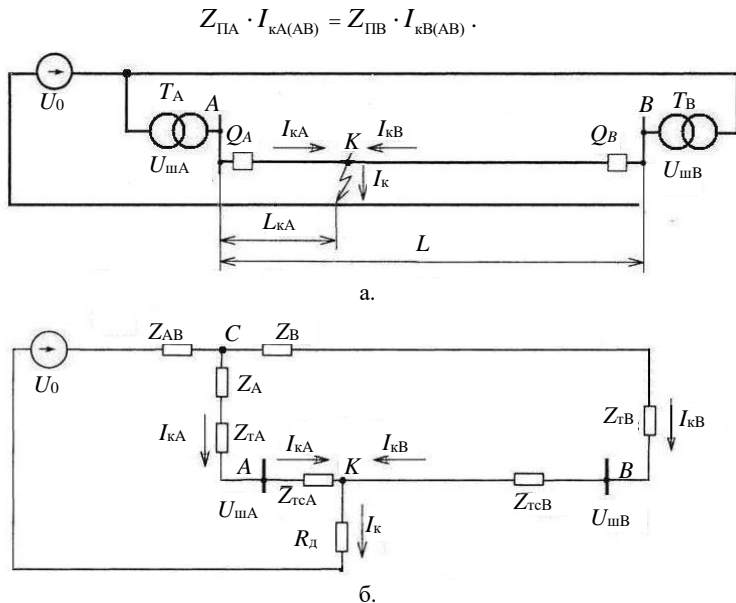


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) электрической сети с двухсторонним питанием от одной системы внешнего электроснабжения:

T_A и T_B – тяговые трехфазные трансформаторы подстанций A и B ;
 Q_A и Q_B – выключатели фидеров на подстанциях A и B ; $U_{\text{шA}}$ и $U_{\text{шB}}$ – напряжения на шинах подстанций A и B ; Z_{AB} – сопротивление питающей линии, общей для подстанций A и B , называемое далее взаимным сопротивлением;
 Z_A – сопротивление питающей линии подстанции A ; Z_B – сопротивление питающей линии подстанции B ; Z_{TA} и Z_{TB} – сопротивления короткого замыкания тяговых трансформаторов T_A и T_B подстанций A и B ; $Z_{TCА}$ и Z_{TCB} – сопротивления участков тяговой сети от места КЗ до подстанций A и B ; I_k – ток короткого замыкания;
 U_0 – напряжение питающей системы внешнего электроснабжения.

Здесь $I_{\text{кА(А)}}$ и $I_{\text{кВ(В)}}$ – токи питающих линий подстанций A и B при коротком замыкании на шинах только одной подстанции, указанной в скобках; вторая подстанция при этом отключена; $I_{\text{кА(АВ)}}$ и $I_{\text{кВ(АВ)}}$ – токи питающих линий подстанций A и B при коротком замыкании одновременно на шинах двух подстанций A и B , указанных в скобках.

Решая совместно уравнения (3)-(5), получим:

$$Z_{ПВ} = U_0 \cdot \frac{(I_{кВ(В)} - I_{кА(А)}) \cdot I_{кА(АВ)}}{(I_{кВ(АВ)} - I_{кА(АВ)}) \cdot I_{кА(А)} \cdot I_{кВ(В)}}. \quad (6)$$

$$Z_{ПА} = Z_{ПВ} \cdot \frac{I_{кВ(АВ)}}{I_{кА(АВ)}} = U_0 \cdot \frac{(I_{кВ(В)} - I_{кА(А)}) \cdot I_{кВ(АВ)}}{(I_{кВ(АВ)} - I_{кА(АВ)}) \cdot I_{кА(А)} \cdot I_{кВ(В)}}. \quad (7)$$

$$Z_{АВ} = \frac{U_0}{I_{кВ(В)}} - Z_{ПВ} = U_0 \cdot \left[\frac{I_{кВ(АВ)} \cdot I_{кА(А)} - I_{кВ(В)} \cdot I_{кА(АВ)}}{(I_{кВ(АВ)} - I_{кА(АВ)}) \cdot I_{кА(А)} \cdot I_{кВ(В)}} \right]. \quad (8)$$

Значения указанных выше сопротивлений используются далее для определения удаленности места короткого замыкания от подстанций.

Опишем способ определения места КЗ. Как видно из рис. 1, ток I_K является суммой двух токов, которые посылают к месту короткого замыкания подстанции A и B :

$$\underline{I}_K = \underline{I}_{КА} + \underline{I}_{КВ}. \quad (9)$$

Токи $\underline{I}_{КА}$ и $\underline{I}_{КВ}$ проходят по двум параллельным ветвям. Известно, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально сопротивлению параллельно соединенных ветвей. На схеме (рис. 1) показано, что обе подстанции питаются от одной энергетической системы. Токи в параллельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей, т.е.:

$$\frac{\underline{I}_{КА}}{\underline{I}_{КВ}} = \frac{\underline{Z}_{ПВ} + \underline{Z}_{ТС.В}}{\underline{Z}_{ПА} + \underline{Z}_{ТС.А}} = \frac{\underline{Z}_{В} + \underline{Z}_{ТВ} + \underline{Z}_{ТС.В}}{\underline{Z}_{А} + \underline{Z}_{ТА} + \underline{Z}_{ТС.А}} = \underline{K} = K \cdot e^{j\varphi_K}. \quad (10)$$

где φ_K – фазовый параметр комплексного коэффициента K : для подстанции A : \underline{Z}_A , $\underline{Z}_{ТА}$ и $\underline{Z}_{ПА}$ – сопротивление питающей линии, сопротивление короткого замыкания тягового трансформатора и сопротивление подстанции A ; для подстанции B : \underline{Z}_B , $\underline{Z}_{ТВ}$ и $\underline{Z}_{ПВ}$ – сопротивление питающей линии, сопротивление короткого замыкания тягового трансформатора и сопротивление подстанции B ; $\underline{Z}_{ТСА}$ и $\underline{Z}_{ТСВ}$ – сопротивления тяговой сети от места КЗ до подстанции A и подстанции B .

Обозначим полное сопротивление тяговой сети $\underline{Z}_{ТС}$ с учетом того, что:

$$\underline{Z}_{ТСА} + \underline{Z}_{ТСВ} = \underline{Z}_{ТС}. \quad (11)$$

Из формул (10) и (11) можно определить сопротивления $\underline{Z}_{TC.A}$ тяговой сети от тяговой подстанции A до места КЗ и $\underline{Z}_{TC.B}$ от тяговой подстанции B до места КЗ:

$$\underline{Z}_{TC.A} = \frac{\underline{Z}_{П.B} - K \cdot \underline{Z}_{П.A} + \underline{Z}_{TC}}{K + 1}; \quad (12)$$

$$\underline{Z}_{TC.B} = \frac{K \cdot \underline{Z}_{П.A} - \underline{Z}_{П.B} + \underline{Z}_{TC}}{K + 1}. \quad (13)$$

Расстояние $L_{КА}$ от тяговой подстанции A до места КЗ определяется по формуле:

$$L_{КА} = \frac{Z_{TCA}}{Z_{TC}} \cdot L. \quad (14)$$

Аналогично расстояние от места КЗ до подстанции B определяется:

$$L_{KB} = \frac{Z_{TCB}}{Z_{TC}} \cdot L. \quad (15)$$

Достоинством формул (14) и (15) является то, что в них не входит величина переходного сопротивления R_d в месте КЗ и сопротивление общей линии электропередачи Z_{AB} . Поэтому их значения знать не обязательно, оно не отражается на точности определения расстояния до места КЗ.

IV. Программа для определения удаленности места короткого замыкания

По приведенным выше уравнениям составлена программа для определения удаленности места короткого замыкания. Предварительно в программу вводятся значения сопротивлений питающих линий, сопротивления короткого замыкания трансформаторов и сопротивление тяговой сети межподстанционной зоны от подстанции A до подстанции B . По их значениям рассчитываются внутренние сопротивления $\underline{Z}_{П.A}$ и $\underline{Z}_{П.B}$ подстанций A и B . После отключения выключателями Q_A и Q_B короткого замыкания в центр управления с интеллектуальных терминалов ИнТер, установленных на подстанциях A и B , в программу вводятся зафиксированные параметры аварийного режима: напряжения на шинах подстанций, токи фидеров и углы сдвига по фазе между соответствующими напряжениями и токами φ_A и φ_B .

Далее, по формуле (10) рассчитывается комплексный коэффициент \underline{K} . Отметим, что для нахождения фазового аргумента φ_K коэффициента \underline{K}

векторы токов $\underline{I}_{КА}$ и $\underline{I}_{КВ}$ должны быть взаимно ориентированы относительно базовой оси, в качестве которой можно принять вектор напряжения \underline{U}_C в точке C (рис. 1, б), который является общим для указанных токов в ветвях. Для нахождения напряжения \underline{U}_C в точке C , фазы токов $\underline{I}_{КА}$ и $\underline{I}_{КВ}$ поочередно принимаются за нуль (рис. 2).

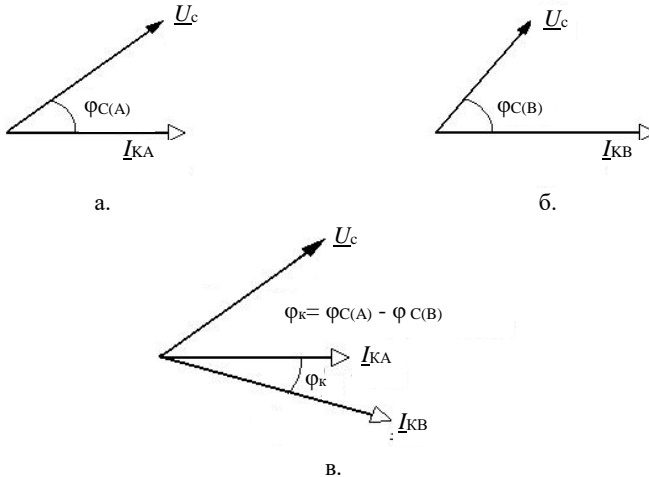


Рис. 2. Нахождение фазового аргумента φ_k коэффициента \underline{K}

Разность вычисленных аргументов $\varphi_{C(A)}$ и $\varphi_{C(B)}$ напряжений в точке C для двух указанных выше случаев и будет аргументом φ_k коэффициента \underline{K} . Далее по формуле (14) рассчитывается расстояние от места КЗ до подстанции A и по формуле (15) – до подстанции B . Погрешность определения удаленности места КЗ составляет менее 0,1%.

Заметим, что если интеллектуальные терминалы ИнТер, установленные на подстанциях A и B , сами определяют базовый вектор и ориентируют относительно него все требуемые параметры аварийного режима, то значение сопротивления контактной сети от места КЗ до подстанции A определяется по формуле:

$$\underline{Z}_{ТC.A} = \frac{\underline{U}_{Ш.A} - \underline{U}_{Ш.ИA} + \underline{Z}_{ТC} \cdot \underline{I}_{КВ}}{\underline{I}_{КА} + \underline{I}_{КВ}}. \quad (16)$$

Далее по формуле (14) рассчитывается расстояние от места КЗ до подстанции A .

В. Заключение

С помощью предлагаемого метода за счет повышения точности определения места повреждения можно ускорить нахождение этого места повреждения в сети, сократить перерывы в электроснабжении потребителей, тем самым повысив надежность системы электроснабжения.

© Серебряков А.С., 2018

© Осокин В.Л., 2018

Библиографический список

- [1] Фигурнов Е.П. Релейная защита: Учебник. В 2 ч. Ч 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с.
- [2] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока. М.: Маршрут, 2006. – 272 с.
- [3] Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2005. – 216 с.
- [4] СТО РЖД 07.021.4-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока. Шифр 11.176 ЦЭ ОАО «РЖД» 2015 г.
- [5] Герман Л.А., Кишкурно К.В. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 1. С. 16-21.
- [6] Герман Л.А. Способ определения узлового взаимного сопротивления в тяговой сети железных дорог. Пат. 23967077 РФ, опубли. 20.08.2001.

A.S. Serebryakov, V.L. Osokin

DETERMINATION OF DISTANCE TO SHORT CURCUIT POINT IN ELECTRIC NETWORK WITH TWO-WAY POWER SUPPLY

Nizhny Novgorod Engineering-economic State University
Knyaginino, Russia

Abstract. The article is devoted to the issues of determining the distance of the short circuit in the electrical complex with two-way power supply. The high accuracy of determining the location of the damage reduces the interruptions in the power supply and reduces the damage caused by a short circuit. The authors proposed a method for determining the distance to the short circuit point in the inter-station zone of the traction alternating current network of a single-track section of the railway. The calculation algorithm eliminates the error from the influence of the electric arc or transient resistance arising at

the short circuit point. The method is considered on the example of two adjacent substations of the electrified section, receiving power from one external power supply system. Substations have such mutual resistance that the current consumed in a short circuit of one substation affects the current value of another substation. It is shown that the mutual resistance and the presence of a transient resistance and an electric arc in the short circuit point do not affect the accuracy of determining the short circuit distance when determining the distance of a short circuit using the proposed method.

Keywords: emergency mode, loop resistance, short circuit distance, traction network of electrified railway, two-way power.

References

- [1] E.P. Figurnov, Relay Protection: Tutorial. T. 2. Moscow: UMT ZHTT, 2009.
- [2] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and T.E. Petrova, Relay protection of traction AC power supply networks. Moscow: Route, 2006.
- [3] Guidelines for relay protection of traction power supply systems. Moscow: TRANSIZDAT, 2005.
- [4] STO RZD 07.021.4-2015. Protection of power supply systems of the railway against short circuits and overload. Part 4. The method of selection of protection settings in the system of traction power supply of alternating current. Cipher 11.176 TSE JSC «RZD» 2015.
- [5] L.A. German and K.V. Kishkurno. Comparison between calculation methods of electric traction power supply system at various parameter account techniques of external power supply network // Vestnik of the Railway Research Institute, vol. 1, pp. 16-21, 2013.
- [6] L.A. German. The method of determining the nodal mutual resistance in the traction network of railways // R.F. Patent 23967077, August 20, 2001.

УДК 620.92:662.997

С.Е. Фрид, Н.В. Лисицкая

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Объединенный институт высоких температур РАН

Рассмотрены вопросы использования электроэнергии, выработанной солнечными батареями для получения горячей воды. В условиях, когда снижаются темпы роста рынка солнечных коллекторов и значительно снижена стоимость фотоэлектрических модулей, экономически оправданным становится получение низкопотенциального тепла за счет выработанной солнечными батареями энергии. Выполнено динамическое моделирование работы фотоэлектрического солнечного водонагревателя на территории России и расчет необходимого количества модулей (паспортной мощности солнечной батареи) для обеспечения потребителя горячей водой с долей покрытия нагрузки 0,5 и 0,7. Показано, что благоприятными для такого использования солнечных батарей являются территории большей части Восточной Сибири и Дальнего Востока вплоть до широт, превышающих 60° . Для проведения подобных оценок построены аппроксимационные соотношения. Исследована возможность отказа от такого контроллера с прямой работой солнечной батареи на электронагреватель постоянного сопротивления. Оптимизация величины этого сопротивления показала, что максимальный среднегодовой КПД солнечной батареи достигается в диапазоне сопротивлений 5-7 Ом в расчете на один фотоэлектрический модуль. Динамическое моделирование работы фотоэлектрического водонагревателя без контроллера с электронагревателем сопротивлением 6 Ом на модуль показало, что требуемое количество модулей по сравнению с установкой с контроллером увеличивается. Однако это увеличение в местах, благоприятных для использования фотоэлектрических водонагревателей, составляет порядка 30%. Это может оказывать меньшее влияние на стоимость системы, нежели включение в ее состав дорогостоящего контроллера, поэтому возможность работы солнечных батарей на электронагреватель постоянного сопротивления следует рассматривать как перспективную.

Ключевые слова: MPPT-контроллер, солнечная батарея, солнечный водонагреватель, фотоэлектрический модуль, фотоэлектрический нагреватель.

I. Введение

Одной из важнейших задач энергетики является теплоснабжение, на которое в России приходится около трети всего энергопотребления. В течение длительного времени использование для подогрева воды электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями, считалось чрезмерно дорогим и нерациональным.

Основным элементом солнечных водонагревателей до последнего времени служил солнечный коллектор. Это теплообменник, состоящий из панели, поглощающей солнечное излучение, с присоединенными к ней каналами для нагреваемого теплоносителя. Панель помещается в плоский ящик с застекленной лицевой поверхностью и теплоизолированными остальными поверхностями [1]. Интерес к использованию солнечных батарей для получения горячей воды возник задолго до экономической обоснованности таких решений. В 1994 году был получен патент на схему фотоэлектрического водонагревателя (ФЭВН) [2].

Суммарная установленная мощность фотоэлектрических установок в мире к 2016 году достигла 303 ГВт, выработка – 375 ТВтч [3]. Темпы роста рынка фотоэлектрических модулей (ФЭМ) увеличиваются: в 2014 году они составляли 28%, в 2016 – 33% [3]. За последние 10 лет цена ФЭМ упала на порядок [4, 5], что было достигнуто преимущественно за счет организационно-финансовых мер, поэтому есть перспективы дальнейшего снижения цены. Приблизительно к 2012 году нижняя граница стоимости ФЭМ опустилась ниже 0,4 долл за пиковый ватт, и экономические оценки стали благоприятными для ФЭВН, что заставило вновь обратить внимание на использование электроэнергии от солнечных батарей для нагрева воды.

В России солнечные водонагреватели широкого распространения пока не получили. Суммарная площадь солнечных коллекторов в стране составляет 30–60 тыс. м². Производство сосредоточено в основном на двух предприятиях, выпускающих приблизительно по 2000 м² коллекторов в год. В отличие от солнечного теплоснабжения фотоэлектрическая генерация в России поддерживается государством. Общий объем производства ФЭМ составляет около 300 МВт/год. Характерная цена ФЭМ в России составляет менее 1 долл за пиковый ватт, что соответствует уровню конкурентоспособности ФЭВН по данным Американского Общества инженеров-механиков [2].

II. Постановка цели и задач

Около 70% территории России располагается вне зоны централизованного энергоснабжения. Благоприятные для использования солнечного тепла южные регионы страны в большинстве своём попадают в зону централизованного энергоснабжения. Значительными ресурсами солнечной энергии располагают и некоторые северные регионы страны, например, Якутия [6], однако работа солнечных коллекторов в этих местах затруднена низкими зимними температурами, существенно увеличивающими тепловые потери коллекторов и обуславливающими необходимость мер защиты от замерзания в них теплоносителя. На этих территориях могут быть применены ФЭВН, лишенные этих недостатков.

Систематические исследования применимости и конкурентоспособ-

ности фотоэлектрических водонагревателей в климатических условиях России до последнего времени не проводились, господствующей остается точка зрения, что такое использование электроэнергии, выработанной солнечными батареями, нерационально. В то же время нам удалось показать, что в условиях как южных регионов России, так и Якутии, ФЭВН по стоимости сравнялись с традиционными солнечными водонагревателями [7]. ФЭВН обладают целым рядом преимуществ, среди которых:

- 1) удобство работы с электрическими нагревателями вместо гидравлических схем;
- 2) при снижении температуры окружающего воздуха эффективность ФЭВН не падает, как у солнечных коллекторов, а, наоборот, растет;
- 3) эффективность нагрева воды электронагревателем от температуры воды не зависит, что позволяет, аккумулируя горячую воду при более высокой температуре, чем у традиционной СВУ, использовать бак меньшего объема и стоимости;
- 4) возможность работать вместе с солнечным электрогенератором в составе когенерационной установки.

Как показано еще в 2014 году, в некоторых случаях наличие электродвигателя снижает стоимость когенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания [8]. Выработка тепла дополнительно к электроэнергии фотоэлектрической установкой позволяет уменьшить емкость и стоимость аккумулятора электроэнергии, используя вместе с ним аккумулятор тепла.

Принято считать, что площадь фотоэлектрических батарей должна быть втрое больше, чем площадь солнечных коллекторов для получения сравнимой производительности водонагревателей [9, 10]. Но, по нашим оценкам, соотношение площадей солнечных батарей и коллекторов составляет для южных регионов России 1,6-2,3, а для северных – 1,2-1,6 [7].

В состав ФЭВН входят солнечные батареи, контроллер и бак-аккумулятор с электронагревателями. Уникальным из них является только контроллер. Он согласует сопротивление нагрузки с внутренним сопротивлением солнечных батарей и обеспечивает работу последних в точке максимальной мощности (maximum power point tracking, МРРТ).

Настоящая работа продолжает исследования использования ФЭМ для нагрева воды [7]. Основная цель – оценка перспектив ФЭВН в Российской Федерации. При этом решались задачи оценки необходимой установленной мощности солнечных батарей для обеспечения нормативной нагрузки по горячему водоснабжению индивидуального жилого дома на 50% и 70% на всей территории России. Одновременно оценивалась возможность работы солнечных батарей на электронагреватель постоянного сопротивления и отказа от дорогостоящего МРРТ контроллера.

III. Методика расчета

Необходимая установленная мощность солнечных батарей оценивалась путем математического моделирования ФЭВН с использованием системы динамического моделирования установок возобновляемой энергетики TRNSYS [1, 11]. При этом доля покрытия нагрузки за счет солнечной энергии определялась как отношение использованной на подогрев воды электроэнергии, выработанной солнечной батареей, к энергии, необходимой для нагрева воды от температуры в водопроводе до требуемой температуры горячей воды. Схема моделируемого ФЭВН приведена на рис. 1.

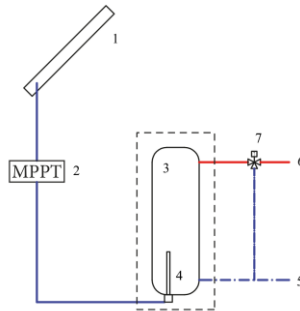


Рис. 1. Принципиальная схема ФЭВН:

- 1 – ФЭП; 2 – MPPT-контроллер; 3 – бак-аккумулятор; 4 – электронагреватель;
5 – ввод холодной воды; 6 – вывод горячей воды; 7 – смеситель

Моделирование по существу сводилось к численному решению дифференциального уравнения теплового баланса бака-аккумулятора, который считался полностью перемешанным и идеально теплоизолированным. В расчетах использовался типовой суточный график нагрузки из «Основ солнечной теплоэнергетики» [1]. Нормативы суточного расхода горячей воды в различных регионах России несколько отличаются друг от друга, но типичное значение для благоустроенных жилых домов составляет 100 л в день на человека. Исходя из типичного состава семьи в четыре человека, в расчетах суточный расход горячей воды принимался равным 400 л, температура горячей воды – 60° С, холодной водопроводной воды – 5° С [12]. В систему также добавлен смеситель, регулирующий расход воды через установку таким образом, чтобы после смешения с поступающей в обход установки холодной водой её температура была равна требуемой.

Наиболее сложной в составе ФЭВН является модель фотоэлектрического модуля, эквивалентная схема которого приведена на рис. 2.

В рамках использованной модели вольтамперная характеристика (ВАХ) ФЭМ описывается четырьмя параметрами: фототоком I_L и обрат-

ным током $p - n$ перехода I_0 в стандартных условиях, внутренним сопротивлением R_s и изменяющимся от 1 до 2 коэффициентом неидеальности ВАХ γ [1]. Эти параметры производителем ФЭМ, как правило, не предоставляется. Обычно в наличии имеются результаты испытаний в стандартных условиях STC (standard test conditions: 1000 Вт/м², 25° С): напряжения и токи в точках холостого хода, короткого замыкания и максимальной мощности характеристики ФЭМ. Для определения по ним параметров модели необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений [1], что выполняется в модуле TRNSYS, описывающем ФЭМ, до начала моделирования. Расчет температуры ФЭМ в зависимости от температуры окружающего воздуха и учет ее влияния на его параметры выполняется с использованием результатов испытаний NOCT (nominal operating cell temperature: 800 Вт/м², 20° С, скорость ветра 1 м/с, без нагрузки): температурных коэффициентов тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. В результате рассчитываются ток и напряжение в точке максимальной мощности, а также ток при заданном напряжении на нагрузке.

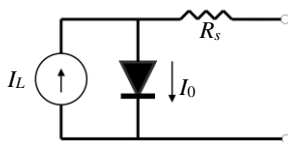


Рис. 2. Эквивалентная схема ФЭМ

Большое количество параметров ФЭП, необходимых для расчета, не позволяет моделировать произвольный модуль. В качестве типичных были выбраны изготавливаемые по наиболее часто встречающейся технологии широко распространенные кремниевые мультикристаллические модули YL255P-29В производства одного из крупнейших мировых производителей – китайской компании Yingli Solar (паспортная мощность – 255 Вт, площадь – 1,62 м², паспортный КПД – 15,7% [13]).

Поскольку анализировались ФЭВН круглогодичного действия, расчет выполнялся только для территории России южнее Полярного круга. Использовались дневные суммы поступающего на земную поверхность солнечного излучения и температуры окружающего воздуха из базы данных спутниковых наблюдений NASA POWER [14]. Угол наклона фотоэлектрических модулей к горизонту считался на 15° больше широты местности (что обеспечивает максимальное поступление солнечного излучения в зимний период). Результаты расчета приведены ниже.

IV. Обсуждение результатов

Построенная по результатам расчета карта распределения требуемого для обеспечения доли покрытия нагрузки $\delta = 0,5$ количества ФЭМ (N)

приведена на рис. 3. Ожидается благоприятными для использования ФЭВН являются южные регионы России, однако невысокие значения N характерны для большей части Восточной Сибири и Дальнего Востока вплоть до широт, превышающих 60° , в частности, большей части Якутии. В этих регионах фотоэлектрические водонагреватели весьма перспективны.

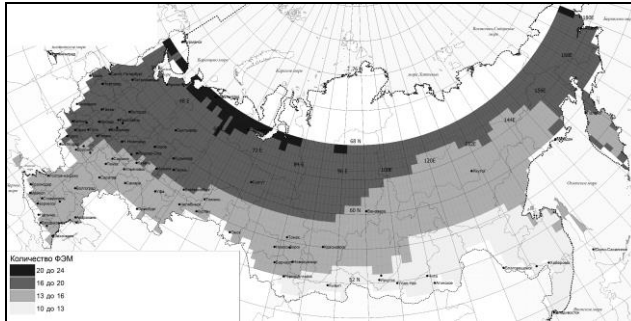


Рис. 3. Распределение по территории России требуемого для обеспечения доли покрытия нагрузки $\delta = 0,5$ количества ФЭМ в ФЭВН

Несомненный интерес представляет оценка требуемого количества ФЭМ в зависимости от имеющейся в справочниках и климатических базах данных среднегодовой дневной суммы солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность (S). Результаты расчета (рис. 4) позволяют такую оценку выполнить. Поскольку фотоэлектрические модули водонагревателя располагаются не горизонтально (как указано выше, принятый угол наклона был на 15° больше широты местности), помимо S в представление результатов расчета необходимо ввести зависимость от широты (φ). На рис. 4 это сделано путем деления N на $\cos^{1/2}(\varphi)$, что позволяет уменьшить разброс данных. Полученные результаты удовлетворительно аппроксимируются пригодным для оценки количества фотоэлектрических модулей соотношением:

$$N = \cos^{1/2}(\varphi) \cdot [N_0 + a \cdot \exp(-S/t)], \quad (1)$$

где значения коэффициентов N_0 , a и t составляют, соответственно, 10,9, 360 и 0,82 для $\delta = 0,5$ и 19,4, 7000 и 0,45 для $\delta = 0,7$.

Хотя расчет был выполнен только для расхода горячей воды 400 л в день, его результаты могут быть распространены и на другие нагрузки, поскольку по отношению к N и нагрузке задача линейна. Величиной, ха-

рактически характеризующей потребность в ФЭМ, может быть требуемая мощность солнечной батареи в расчете на 100 л в день горячей воды $P_{\text{МРРТ}}$, равная нормированному на нагрузку произведению паспортной мощности ФЭМ на N . Данные по $P_{\text{МРРТ}}$ приведены вместе с N на рис. 4.

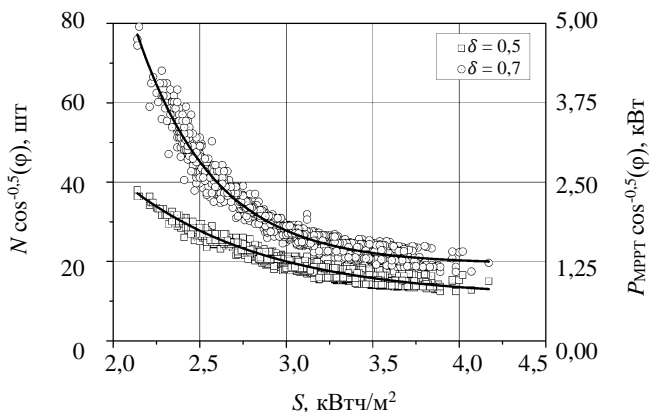


Рис. 4. Требуемое количество панелей N и мощность в расчете на 100 л горячей воды $P_{\text{МРРТ}}$ в зависимости от среднегодовой суммы солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность S

Одним из дорогостоящих элементов схемы ФЭВН является МРРТ контроллер, стоимость которого у российских поставщиков составляет 60-70 тыс. руб., при этом он обслуживает 6-8 ФЭМ, увеличивая стоимость фотоэлектрической части установки в 1,6-2 раза [13, 15]. Одним из способов снижения затрат может быть отказ от контроллера и работа солнечной батареи напрямую на электронагреватель постоянного сопротивления (на рис. 1 это соответствует исключению из схемы элемента 2). При этом среднегодовой КПД ФЭМ ($\eta_{\text{ФЭМ}}$) уменьшается в сравнении с КПД модуля при работе с контроллером МРРТ ($\eta_{\text{МРРТ}}$). Среднегодовой КПД в зависимости от сопротивления электронагревателя (R) приведен рис. 5.

Зависимость имеет широкий максимум, расположенный в диапазоне 5-7 Ом в расчете на один ФЭМ. Результаты оценки требуемой мощности солнечной батареи ($P_{R=\text{const}}$) в сравнении с мощностью при ее работе с контроллером МРРТ ($P_{\text{МРРТ}}$) в зависимости от среднегодовой суммы солнечного излучения на горизонтальной поверхности при $R = 6$ Ом представлены на рис. 6. На благоприятных для использования ФЭВН территориях ($S \geq 3$ кВтч/м²) отказ от МРРТ-контроллера требует увеличения мощности солнечной батареи (количества ФЭМ) примерно на 30%, что дешевле контроллера.

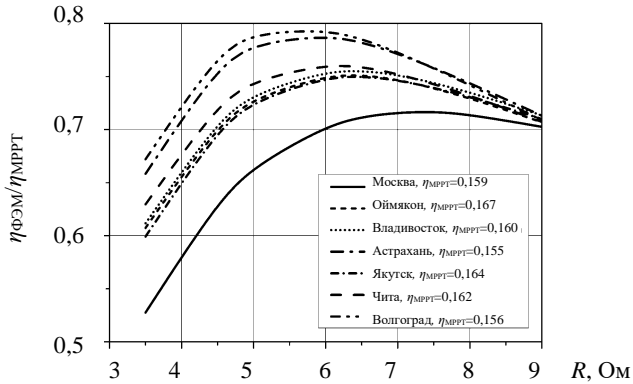


Рис. 5. Среднегодовой КПД ФЭМ в зависимости от сопротивления электронагревателя R

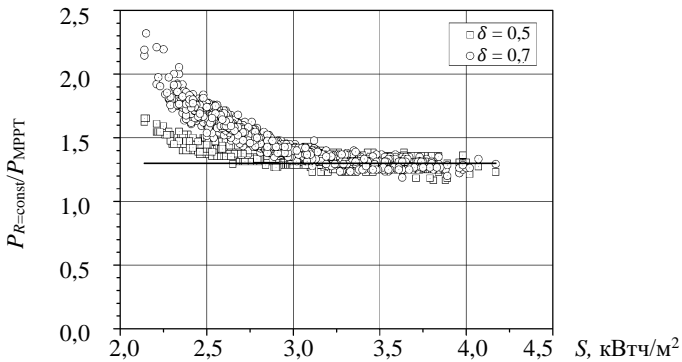


Рис. 6. Соотношение требуемых мощностей солнечной батареи при $R = 6$ Ом при использовании МРРТ контроллера в зависимости от среднегодовой дневной суммы солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность S

V. Заключение

Выполненные расчеты позволили выявить регионы России, благоприятные для получения горячей воды с использованием электроэнергии, выработанной солнечными батареями. Построены аппроксимационные соотношения, позволяющие сделать оценку необходимого для покрытия части нагрузки по горячему водоснабжению количества модулей в солнечной батарее. Показано, что отказ от использования в фотоэлектриче-

ском водонагревателе контроллера MPPT не приводит к резкому снижению эффективности установки и может быть экономически оправдан.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-08-00670.

© Фрид С.Е., 2018

© Лисицкая Н.В., 2018

Библиографический список

- [1] Даффи Дж., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики. Долгопрудный: Интеллект, 2013. – 888 с.
- [2] Fannee A.H., Dougherty B.P. A Photovoltaic Solar Water Heating System // Trans. ASME. J. Solar Energy Eng. 1997. № 119 (5). Pp. 126-133.
- [3] Weiss W., Spörk-Dür M., Mautnier F. Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2016. Detailed Market Figures 2015. 2017 edition. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2017.pdf>. (дата обращения 01.10.2018).
- [4] Haegel N.M. et al. Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges // Science. 2017. № 356 (6334). Pp. 141-143.
- [5] Photovoltaics Report. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. (дата обращения 11.09.2018).
- [6] Попель О.С. и др. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: ОИВТ РАН, 2010. – 84 с.
- [7] Фрид С.Е., Тарасенко А.Б. Использование фотобатарей для горячего водоснабжения – опыт и перспективы // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 16-18. С. 23-38.
- [8] Директор Л.Б., Иванов О.А. О применении электродкотлов в энергетических комплексах малой энергетики // Промышленная энергетика. 2014. № 12. С. 23-27.
- [9] Marken C., Sanchez J. PV vs. Solar Water Heating. Simple Solar Payback // Home power. 2008. № 127. Pp. 40-45.
- [10] Matuska T., Sourek B. Performance Analysis of Photovoltaic Water Heating System // International Journal of Photoenergy. 2017. Article ID 7540250.
- [11] TRNSYS – Transient System Simulation Tool [Электронный ресурс]. URL: <http://trnsys.com/> (дата обращения 05.10.2018).
- [12] СНиП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий. Введ. 07.1986. М.: ГУП ЦПП, 1996. – 60 с.
- [13] Ваш Солнечный Дом. [Электронный ресурс]. URL: <http://shop.solarhome.ru/y1250p-29b-yingli-poli-solnechnye-paneli.html> (дата обращения 05.10.2018).
- [14] POWER Project Data Sets. Solar and meteorological data sets from NASA research for support of renewable energy, building energy efficiency and agricultural needs. [Электронный ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата обращения 05.10.2018).

[15] Торговый дом «Солнечная корона». Солнечное отопление и ГВС. [Электронный ресурс]. URL: <http://solarcrown.ru/magazin2/folder/solnechnoye-otopleniye-igvs> (дата обращения 05.10.2018).

S.E. Frid, N.V. Lisitskaya

PHOTOVOLTAIC GENERATORS FOR HOT WATER SUPPLY

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Abstract. The paper concerns of using electricity generated by solar batteries to produce hot water. The reduction of solar collector market growth rate and a significant reduction of photovoltaic modules cost makes economically feasible to produce low-potential heat with the energy generated by solar panels. Dynamic simulation of photovoltaic solar water heater in Russia and the calculation of required number of PV-modules (module peak power) for the consumer to provide hot water with a load fraction of 0,5 and 0,7 was performed. It is shown that the territories of most of Eastern Siberia and the Far East are favorable for such use of solar batteries up to latitudes exceeding 60°. To carry out similar estimates, approximation equations are constructed. A necessary element of solar power plants is a maximum power point tracking controller. The possibility of rejecting such a controller and solar battery operation on a constant resistance electric heater is investigated. Optimization of the magnitude of this resistance has shown that the maximum average annual efficiency of solar battery is achieved in the resistance range of 5-7 ohms per PV module. Dynamic simulation of photovoltaic water heater without a controller with an electric heater of 6 ohms per module showed that the required number of modules compared to the heater with controller increases, but this increase is about 30% in places favorable for using photovoltaic water heaters. The influence on the cost of the system may be less than the inclusion of an expensive controller, so the possibility of solar batteries operation with a constant resistance electric heater should be considered as promising.

Keywords: MPPT-controller, PV-based water heater, photoelectric heater, photoelectric module, photovoltaic panel, solar water heater.

References

- [1] J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes* (3d ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [2] A.H. Fanney and B.P. Dougherty. A Photovoltaic Solar Water Heating System // *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 119, no. 5, pp. 126-133, 1997.
- [3] W. Weiss, M. Spörk-Dür and F. Mautnier, *Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2016. Detailed Market Figures 2015*. 2017 edition. [Online]. Available at: <http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2017.pdf> [Accessed: Oct. 1, 2018].

- [4] N.M. Haegel et al. Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges // *Science*, vol. 356, no. 6334, pp. 141-143, 2017.
- [5] Photovoltaics Report. [Online]. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> [Accessed: Sept. 11, 2018].
- [6] O.S. Popel, S.E. Frid, Yu.G. Kolomiets, S.V. Kiseleva and E.N. Terekhova, Atlas of Resources of Solar Energy on the Territory of Russia. Moscow: OIVT RAS, 2010.
- [7] S.E. Frid and A.B. Tarasenko. Experience and prospects of water heating using PV panels // *Alternative Energy and Ecology*, no. 16-18, pp. 23-38, 2018.
- [8] L.B. Direktor and O.A. Ivanin. On the application of electric boilers in the energy complexes of small-scale power generation // *Industrial power engineering*, no. 12, pp. 23-27, 2014.
- [9] C. Marken and J. Sanchez. PV vs. Solar Water Heating. Simple Solar Payback // *Home power*, no. 127, pp. 40-45, 2008.
- [10] T. Matuska, B. Sourek. Performance Analysis of Photovoltaic Water Heating System // *International Journal of Photoenergy*, vol. 2017, article ID 7540250.
- [11] TRNSYS – Transient System Simulation Tool. [Online]. Available at: <http://trnsys.com/> [Accessed: Oct. 5, 2018].
- [12] SNiP 2.04.01-85. Internal water supply and water carriage of buildings. Entered 07.1986, 1996.
- [13] Solar Home. [Online]. Available at: <http://shop.solarhome.ru/yl250p-29b-yingli-poli-solnechnye-paneli.html> [Accessed: Oct. 5, 2018].
- [14] POWER Project Data Sets. Solar and meteorological data sets from NASA research for support of renewable energy, building energy efficiency and agricultural needs. [Online]. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/> [Accessed: Oct. 5, 2018].
- [15] Solar crown. Solar heating and hot water supply. [Online]. Available at: <http://solarcrown.ru/magazin2/folder/solnechnoye-otopleniye-i-gvs> [Accessed: Oct. 5, 2018].

УДК 623.19

Д.М. Кочеганов, А.В. Серебряков**ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ
В АВТОНОМНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ КОМПЛЕКСАХ
НА ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

В удаленных районах России энергообеспечение большинства потребителей осуществляется с помощью автономных источников. Характерной особенностью таких электротехнических комплексов является вероятностный характер процесса формирования электрических нагрузок. Для повышения эффективности систем электроснабжения важными являются вопросы определения числовых значений графиков нагрузки. В статье рассмотрены процессы формирования графиков нагрузки автономных потребителей. Для автономного жилого дома определена средняя установленная мощность и критическая минимальная нагрузка. С целью экономии средств на создание автономного генераторного комплекса предложена схема системы электроснабжения с обособленной тепловой нагрузкой. Для определения экономического эффекта от использования схемы с дифференцированием нагрузки проведен сравнительный анализ схем автономных систем электроснабжения. Установлено, что предложенная схема позволяет снизить капитальные затраты за счет питания потребителей третьей категории от шин источника энергии напрямую.

Ключевые слова: автономная система электроснабжения, автономный генераторный комплекс, ветроэнергетическая установка, график нагрузки, потребитель электроэнергии.

1. Введение

Особенность географического положения Российской Федерации и наличие больших территорий с низкой плотностью населения обуславливает необходимость автономного энергообеспечения удаленных районов. В качестве автономных источников электроэнергии (АИЭ) широко распространены дизельные электростанции и котельные агрегаты, работающие на угле, мазуте или другом невозобновляемом топливе. Однако данные энергоустановки становятся все более затратными, а их использование отрицательно сказывается на экологии. Новая аппаратная база электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной

техники дополнительно стимулирует разработчиков на создание высокотехнологичных, энергоэффективных, надежных и быстро окупаемых агрегатов и систем [1, 2].

АИЭ должен обеспечивать длительное бесперебойное питание объекта при различных параметрах окружающей среды [3, 4]. Нагрузка оказывает значительное влияние на формирование структуры системы электроснабжения (СЭС). Установлено, что процесс формирования электрических нагрузок носит вероятностный характер, поэтому при определении закономерностей формирования и числовых значений графика нагрузок потребителя могут быть применены общепринятые методы теории вероятностей и математической статистики. С использованием этих методов могут быть установлены числовые характеристики и законы распределения рассматриваемых величин.

II. Графики нагрузки

Процесс формирования графика нагрузки группы электроприемников автономных потребителей рассмотрен в работах О.В. Крюкова и А.В. Серебрякова [5, 6]. Включение и отключение отдельных электроприемников можно представить как случайные события. Известно, что случайная величина – график нагрузки – характеризуется функцией распределения, математическим ожиданием и корреляционной функцией, отражающей зависимость между параметрами процесса.

При допущении, что происходит независимое друг от друга включение электроприемников, число электроприемников, работающих одновременно и составляющих групповую нагрузку, может быть определено по биномиальному закону. В этом случае вероятность работы m электроприемников из общего их числа n определяется на основе выражения:

$$P_{(n,m)} = \sum \frac{n!}{m!(n-m)!} \cdot p^m \cdot (1-p)^{n-m}. \quad (1)$$

Построение модели нагрузок «среднего» автономного жилого дома или усадьбы с небольшим хозяйством, получающего питание от АИЭ, заключается в следующем. Для получения графиков нагрузки требуется проведение систематических измерений потребляемой мощности в течение суток. Однако проведение таких измерений является трудоемким. При определении степени согласованности случайных величин допускается для получения графиков их изменения применять экспертные оценки, один из видов пассивного эксперимента. Но это требует большого количества экспертов. Для сокращения времени экспериментов может быть использовано правило приведения одной случайной величины к другой. В результате экспертной оценки были получены данные о времени

работы j -ых нагрузок в i -ый интервал, по которым распределение нагрузок подчиняется нормальному закону. Результаты экспертного опроса проверялись на согласие по критерию Стьюдента для уровня значимости 0,05. Для этого определялись коэффициенты парной корреляции между значениями k -го эксперта и усредненными данными. Коэффициент корреляции определяется по выражению:

$$r_k = \frac{\bar{P}_{cp} \cdot \bar{P}_{ji} - \bar{P}_{cp} \cdot \bar{P}_{ji}}{\sigma_k \cdot \sigma_{cp}}, \quad (2)$$

где r_k – коэффициент корреляции между данными k -го эксперта и средними данными; \bar{P}_{cp} , \bar{P}_{ji} – средние значения усредненного графика и по данным k -го эксперта; σ_k , σ_{cp} – стандартные отклонения усредненного графика и по данным k -го эксперта.

В соответствии с приведенной методикой проверки, наблюдаемое значение критерия Стьюдента должно вычисляться по формуле (2) и сравниваться со стандартным значением при заданном уровне значимости и числе степеней свободы $s = n - 2$ (n – объем выборки).

$$T = r_k \cdot \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_k^2}}. \quad (3)$$

Расчетные значения критерия Стьюдента сравнивались с нормированными значениями для уровня значимости 0,05. Данные эксперта считались согласованными с реальными данными, если расчетное значение критерия Стьюдента превышало нормированное.

На рис. 1,2 показаны приведенные графики электрических нагрузок, отражающие наиболее вероятные значения нагрузок для генеральной совокупности объектов.

На основании карты сбора статистических данных и графиков нагрузки [7-9] можно сделать следующие выводы:

- установленная мощность электроприемников в большинстве индивидуальных хозяйств не превышает 20 кВт;
- критическая минимальная нагрузка, которую должен обеспечивать источник питания, не превышает для большинства хозяйств 2 кВт [10, 11, 12]. Таким образом, может быть определена минимальная мощность P_{min} резервного источника для самого худшего варианта;
- тепловая нагрузка 3-ей категории составляет не менее 60% от общей установленной мощности автономного потребителя.

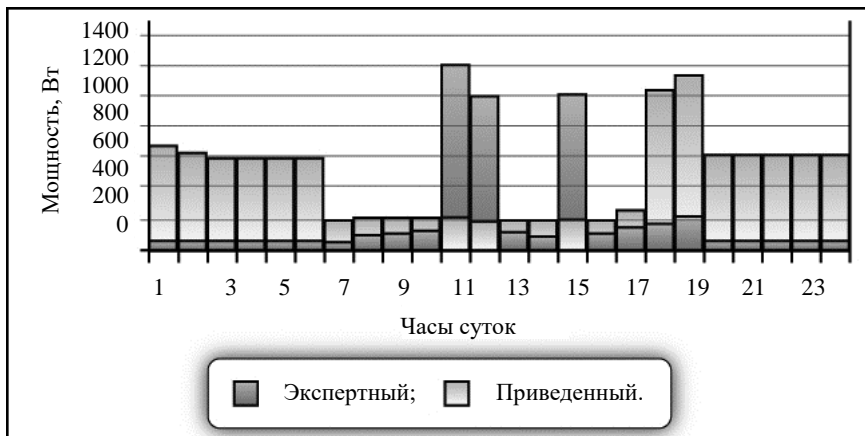


Рис. 1. График нагрузки в весенне-летний период

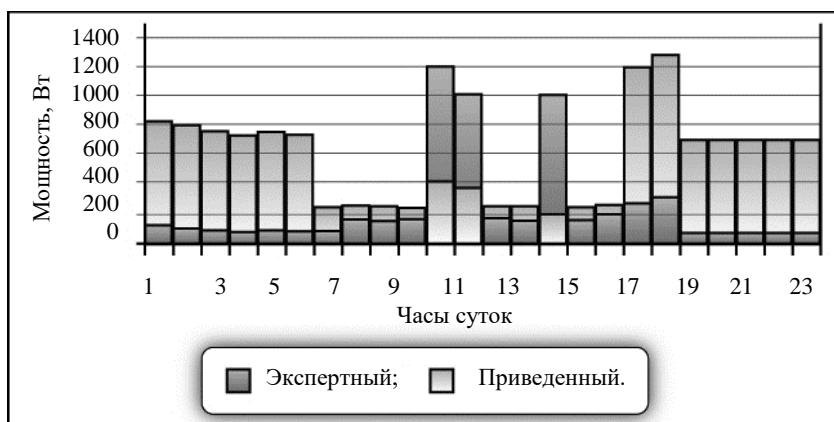


Рис. 2. График нагрузки в осенне-зимний период

III. Модель потребления электрической энергии

На основе полученных данных разработана имитационная модель потребления электрической энергии (рис. 3).

В основу модели положены два принципа: постоянная часть (реальные усредненные статистические данные потребителей) и переменная часть (вероятностная составляющая на основе нормального распределения). Приведенная модель может быть использована для расчета вероятности совпадения нагрузки и поступления энергии для включения в общую модель системы автономного электроснабжения.

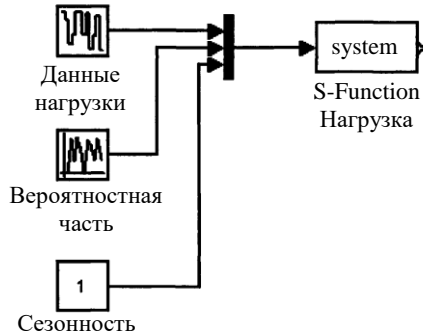


Рис. 3. Упрощенная модель нагрузки автономных потребителей

Однако обособление тепловой нагрузки 3-ей категории позволяет значительно снизить установленную мощность силовой преобразовательной части автономного генераторного комплекса (АГК) и повысить энергетические показатели дизель-электрической установки (ДЭУ). В связи с этим, возможно создание более экономичной структуры автономной СЭС в рамках комбинированного генераторного комплекса с дифференцированием тепловой и электрической нагрузки потребителей (рис. 4).

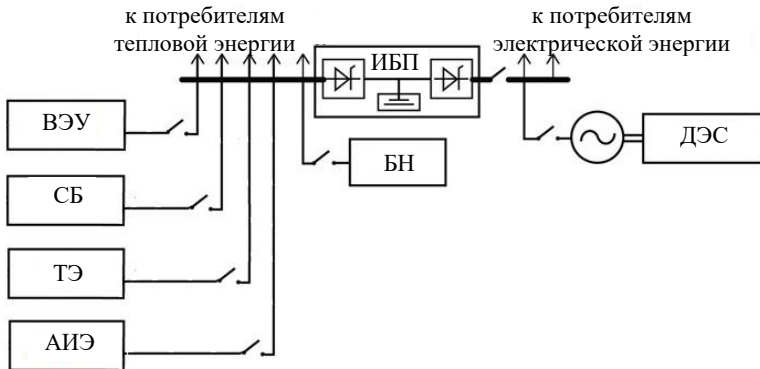


Рис. 4. Схема автономной СЭС с дифференцированием нагрузки:

ВЭУ – ветроэнергетическая установка; СБ – солнечные батареи;
 ТЭ – топливные элементы; АИЭ – альтернативный источник энергии;
 БН – балластная нагрузка; ИБП – источник бесперебойного питания;
 ДЭС – дизель-энергетическая станция

Данная схема обеспечивает подключение потребителей 3-ей категории напрямую к шинам источника энергии, а все потребители электроэнергии получают питание от автономного источника энергии через источник бесперебойного питания (ИБП). При этом ДЭУ выполняет функцию резерва с подключением только в номинальный режим. Данная структура АГК позволяет обеспечить автономные СЭС высококачественной электроэнергией при оптимальной загрузке ДЭУ и минимальном расходе топлива топливным источником энергии (ТИЭ).

Проведенный анализ схем АГК и соответствующие расчеты затрат на топливо при равных условиях эксплуатации установили, что при работе по схеме с дифференцированием тепловой и электрической нагрузки (рис. 5) возможно получение значительного экономического эффекта.

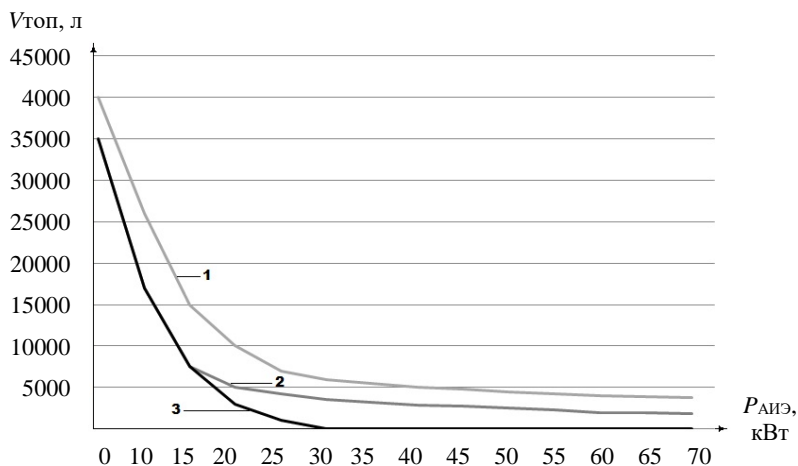


Рис. 5. Расход топлива ДЭУ за год в зависимости от суммарной мощности АИЭ для комбинированного АГК с ДЭУ:

- 1 – АГК с постоянно работающей ДЭУ; 2 – АГК с накопителем энергии;
3 – АГК с дифференцированием нагрузки и накопителем энергии

IV. Выводы

На основе анализа карты сбора статистических данных и графиков нагрузки нескольких автономных жилых объектов определено, что установленная мощность электроприемников не превышает 20 кВт, а тепловая нагрузка 3-ей категории составляет не менее 60% от общей установленной мощности автономного потребителя.

Предложена структура автономной СЭС с дифференцированием нагрузки, позволяющая получить значительную экономию топлива ТИЭ и

снизить капитальные затраты на создание АИЭ за счет питания потребителей 3-ей категории напрямую от шин источника энергии.

© Кочеганов Д.М., 2018

© Серебряков А.В., 2018

Библиографический список

- [1] Мониторинг и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики / О.В.Крюков, Л.А.Макриденко, А.В.Серебряков и др. М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. – 146 с.
- [2] Thorsen V., Dalva M. Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry // 8th IEEE int. conf. EMD '97, University of Cambridge. № 444. Pp. 109-113.
- [3] Kliman G.B., Stein J. Induction motor fault detection via passive current monitoring // Int. conf. ICEM '90, 1990, Boston, USA. Pp. 13-17.
- [4] Thomson W.T., Chalmers S.J., Rankin D. Online current monitoring and fault diagnosis in high voltage induction motors-case histories and cost savings in offshore installations // Offshore Europe '87, Sept. 1987, Aberdeen, UK, SPE-16577-MS.
- [5] Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 4 (29). С. 35-38.
- [6] Серебряков А.В. Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 3. С. 39-46.
- [7] Серебряков А.В., Титов В.Г., Чернов Е.А., Шахов А.В. Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 203-209.
- [8] Серебряков А.В. Энергоэффективные ветроэнергетические установки с оперативной диагностикой для автономных систем электроснабжения: дис. канд. техн. наук, НГТУ, Н. Новгород, 2013. – 171 с.
- [9] Васенин А.Б., Титов В.Г. Как повысить энергоэффективность ветроэнергетической установки // Главный энергетик. 2015. № 1. С. 58-60.
- [10] Стеклов А.С., Серебряков А.В., Титов В.Г. Система диагностики технического состояния судового синхронного генератора // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 1 (112). С. 60-64.
- [11] Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. № 3 (19). С. 549-552.
- [12] Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 97-104.

D.M. Kochegarov, A.V. Serebryakov

**DIFFERENTIATION OF LOADING IN AUTONOMOUS
GENERATOR COMPLEXES BASED
ON ALTERNATIVE ENERGY SOURCES**

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

Abstract. Most consumers are supplied with energy through autonomous sources in remote areas of Russia. A characteristic feature of such electrical systems is the probabilistic nature of the process of the formation of electrical loads. The issues of determining the numerical values of load graphs are important to improve the efficiency of power supply systems. The article describes the processes of formation of load graphs of autonomous consumers. The average installed capacity and the critical minimum load are determined for an autonomous residential building. In order to save money on the creation of an autonomous generator complex, a scheme of the power supply system with a separate heat load was proposed. A comparative analysis of autonomous power supply system has been carried out to determine the economic effect of the use of a circuit with load differentiation. The proposed scheme allows to reduce capital expenditures by supplying consumers of the third category from buses of the power source directly.

Keywords: autonomous power supply system, autonomous generator complex, electricity consumer, load graph, wind power installation.

References

- [1] L.A. Makridenko, S.N. Volkov and A.P. Sarychev, Monitoring and forecasting of the technical state of electromechanical energy systems. Moscow, 2017.
- [2] V. Thorsen and M. Dalva. Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry // in proc. 8th IEEE Int. conf. EMD'97, University of Cambridge, no. 444, pp. 109-113.
- [3] G.B. Kliman and J. Stein. Induction motor fault detection via passive current monitoring // in proc. Int. conf. ICEM '90, 1990, Boston, USA, pp 13-17.
- [4] W.T. Thomson, S.J. Chalmers and D. Rankin. Online current monitoring and fault diagnosis in high voltage induction motors-case histories and cost savings in offshore installations // in proc. Offshore Europe '87, Sept. 1987, Aberdeen, UK, SPE-16577-MS.
- [5] O.V. Kryukov and A.V. Serebryakov. Method and system of decision making of technical state forecast of electric gas compressor units // *Electrotechnical Systems and Complexes*, vol. 4, no. 29, pp. 35-38, 2015.
- [6] A.V. Serebryakov Optimization of diagnostics of electromechanical part of wind-power installations // *Electrical equipment: operation and repair*, vol. 3, pp. 39-46, March 2013.

-
- [7] A.V. Serebryakov, V.G. Titov, E.A. Chernov and A.V. Shakhov. Differentiation loads in power systems autonomous consumers // Proceedings of the NNSTU n.a. R.E. Alekseev, vol. 2, no. 109, pp. 203-209, 2015.
 - [8] A.V. Serebryakov, Energy efficient wind power plants with on-line diagnostics for autonomous power supply systems // Cand. of Tech. S. thesis, NNSTU, N. Novgorod, Russia, 2013.
 - [9] A. Vasenin and V.G. Titov. How to enhance efficiency of wind power mill // Chief Power Engineer, no. 1, pp. 58-60, 2015.
 - [10] A.S. Steklov, A.V. Serebryakov and V.G. Titov. Diagnostic System of the Technical Condition of the Ship Synchronous Generator // Proceedings of the NNSTU n.a. R.E. Alekseev, no. 1 (112), pp. 60-64, 2016.
 - [11] O. Kryukov, A. Serebryakov and A. Vasenin. Diagnosis electromechanical part of wind turbines // Electromechanical and Energy Saving Systems, vol. 3, no. 19, pp. 549-552, 2012.
 - [12] A.S. Steklov, V.G. Titov and A.V. Serebryakov. Determination of degree of use of ship synchronous generators with the use of artificial neuro-fuzzy nets // Bulletin of the Chuvash University, no. 1, pp. 97-104, 2016.

УДК 621.313.3

**В.Н. Мещеряков, А.А. Муравьев,
А.И. Бойков, В.В. Пикалов**

СИСТЕМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Липецкий государственный технический университет

Важным направлением повышения эффективности электротехнических комплексов в составе с ветроустановками является разработка новых систем генерации энергии, реализованных на основе асинхронных машин с фазным ротором. В статье представлены результаты исследования системы генерирования электроэнергии, построенной на базе асинхронной машины с фазным ротором, работающей в режиме машины двойного питания при переменной частоте вращения вала генератора для случая питания роторных обмоток от регулируемого источника переменного тока и подключения статора к трехфазной симметричной активной нагрузке. Рассмотрена конструкция возбудителя, выполненного на базе инвертора напряжения с дополнительными элементами: коммутирующим ключом в звене постоянного тока, последовательно включенными катушкой индуктивности и обратным диодом. Приведена компьютерная модель генераторной установки, реализованная с использованием пакета прикладных программ Matlab Simulink. На основе результатов исследований с использованием компьютерной модели построены графики энергетического баланса в системе. Исследованы показатели энергоэффективности системы и построен трехосевой объемный график, характеризующий влияния скорости и момента на валу генератора на КПД системы. Проведены экспериментальные исследования генераторной установки с разработанной системой возбуждения цепи ротора. Экспериментальная установка построена на базе электрической машины с фазным ротором МТН-011-6. Выполненные экспериментальные исследования энергетических процессов в генераторной установке подтвердили результаты компьютерного моделирования.

Ключевые слова: асинхронный генератор, компьютерное моделирование, машина двойного питания, оптимальный режим, энергетический баланс, энергоэффективность.

1. Введение

Неуклонное увеличение объема выработки электроэнергии с помощью использования альтернативных возобновляемых источников энергии, например, ветроустановок, определяет продолжение разработок новых эффективных систем генерации, построенных не только на традиционной базе – синхронной машине, требующей, использования ряда дополнитель-

ных силовых блоков: мультипликатора, выпрямителя, стабилизатора постоянного тока, инвертора, но и на базе других электрических машин. Среди них можно выделить асинхронную машину с фазным ротором, работающую в режиме машины двойного питания (МДП) [1, 2]. Чтобы обеспечить эффективность применения в качестве генератора асинхронной машины с фазным ротором в установках с переменной скоростью вращения, требуется разработать вентильную систему возбуждения, управляющую напряжением и током в цепи ротора, в функции изменения скорости вращения вала.

В настоящее время разработаны преобразователи частоты, успешно используемые не только для управления короткозамкнутыми асинхронными двигателями. Они способны также управлять машиной двойного питания, в том числе и машиной, выполненной на базе типовой асинхронной машины с фазным ротором, при ее работе, как в двигательном, так и в тормозном режиме [3-5]. Исследован новый тип систем управления преобразователем частоты, выполненным на базе инвертора тока, с релейными регуляторами мгновенных значений фазных напряжений, которые обеспечивают приближенную к синусоидальной форму выходного напряжения с минимальным уровнем высших гармоник [6-8].

II. Постановка цели и задач исследования

Исследование машины двойного питания, работающей в генераторном режиме, основывается на составлении диаграммы энергетического баланса, что позволяет выполнить оценку энергоэффективности установки. Функциональная схема исследуемой установки, выполненной на базе МДП, приведена на рис. 1, где управляемый вентильный источник энергии (УИ) подключен к цепи ротора асинхронной машины (М), вал которой вращается внешним источником механической энергии со скоростью ω_r , к цепи статора подключена трехфазная симметричная активная нагрузка (R). Возбудитель цепи ротора выполнен на базе инвертора напряжения с дополнительными элементами: коммутирующим ключом в звене постоянного тока, последовательно включенными катушкой индуктивности и обратным диодом.

III. Методы решения поставленных задач

Анализ работы генераторной установки на базе МДП (рис. 1) и построение диаграммы энергетического баланса генератора при условии его возбуждения от идеального источника и работы на активную нагрузку проводился методом имитационного моделирования с использованием пакета прикладных программ Matlab Simulink (рис. 2). Исследовалась установка на базе асинхронной машины с фазным ротором МТН-011-6.

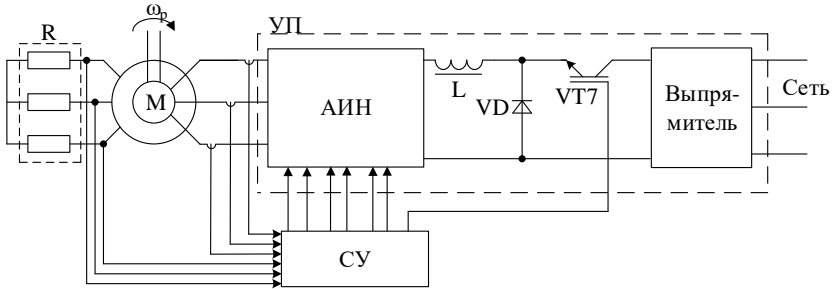


Рис. 1. Функциональная схема генераторной установки

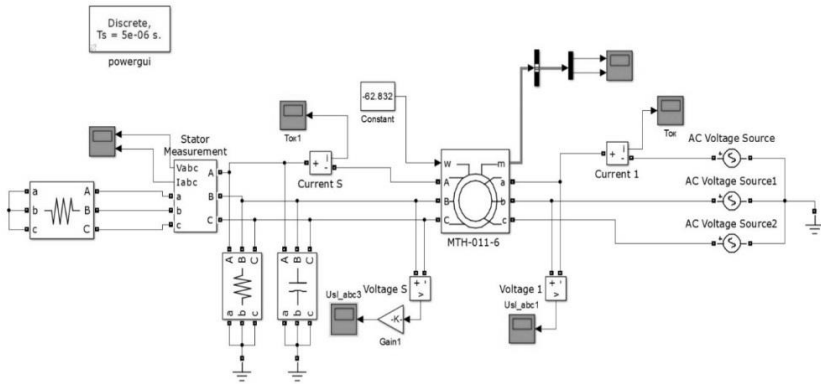


Рис. 2. Модель генераторной установки в Simulink

При работе генератора с переменной скоростью вращения вала величину текущей угловой скорости сопоставляют с угловой скоростью идеального холостого хода машины при заданной частоте напряжения на статоре. Будем рассматривать случай, когда скорость вращения вала генератора меньше скорости его идеального холостого хода при частоте 50 Гц. Для обеспечения постоянства частоты напряжения в цепи статора (равной 50 Гц) в цепь ротора необходимо подавать напряжение с частотой:

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_p, \quad (1)$$

где $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 = 2\pi \cdot 50 = 314$ рад/с [9].

При проведении компьютерных модельных экспериментов контролировался угол сдвига фаз между токами и напряжениями в статорной цепи с помощью трехфазного измерителя. На компьютерной модели исследу-

довался также режим работы генератора со скоростью вращения вала выше синхронной, при этом обеспечивалась смена чередования фаз путем соответствующих переключений в цепи возбуждения двигателя [10].

Зависимость напряжения ротора U_2 от скорости вращения вала снималась при условиях номинальной нагрузки, линейное напряжения на статоре поддерживалось на уровне 380 и 200 В при частоте 50 Гц. Поддержание постоянного значения напряжения осуществлялось путем регулирования величин амплитуды и частоты напряжения ротора в зависимости от скорости вращения вала машины и величины нагрузки.

IV. Результаты исследований

Результаты моделирования позволили построить зависимости напряжения ротора от скорости вращения вала, которые показывает, что мощность в цепи ротора, потребляемая от источника ИП (возбудителя) при низких скоростях, значительно превышает соответствующие значения при скорости вращения близкой к номинальной синхронной скорости. Поэтому необходимо определить рабочий диапазон изменения скорости вращения вала, при котором целесообразно возбуждать генератор и вырабатывать электроэнергию. Для этого был построен график выработки и потребления мощности (рис. 3), на котором введены обозначения мощностей: статора P_1 , ротора P_2 , механической энергии $P_{\text{мех}}$, потери $P_{\text{пот}}$. Эти величины связаны следующими формулами:

$$\begin{cases} P_1 + P_{\text{пот}} = P_{\text{мех}} + P_2; \\ P_{\text{пот}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 + 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2; \\ P_{\text{мех}} = M \cdot \omega_p; \\ P_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_1; \\ P_2 = 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I'_2, \end{cases} \quad (2)$$

где I_1 – ток статора; I'_2 – приведенный ток ротора; R_1 – сопротивление статора; R'_2 – приведенное сопротивление ротора; M – момент на валу; U_1 – напряжение статора; U_2 – напряжение ротора.

Из рис. 3 видно, что для выработки электроэнергии с наименьшими затратами на возбуждение генератора угловая скорость вала генератора должна быть на уровне, не меньше чем 83 рад/с. При этой скорости механическая мощность на валу генератора полностью преобразуется в мощность, передаваемую в цепь обмотки статора. Потери энергии здесь компенсируются за счет энергии, подаваемой в цепь ротора. По мере увеличения угловой скорости генератора растет величина преобразуемой механической энергии, что позволяет уменьшать мощность, передаваемую в цепь

ротора. При этом при скоростях, превышающих скорость холостого хода, возбужденная машина начинает отдавать активную мощность и в цепь обмотки ротора, но по-прежнему продолжает потреблять реактивную мощность.

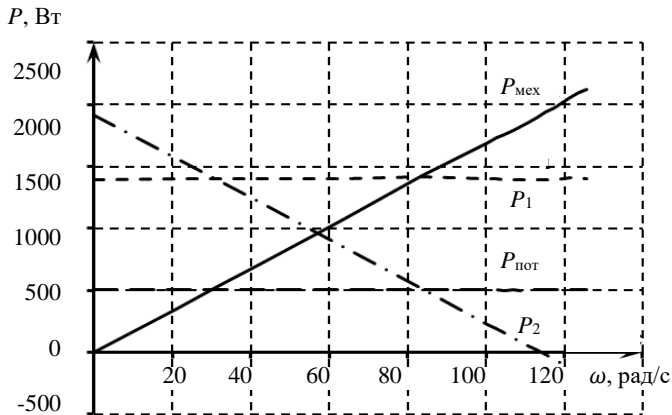


Рис. 3. График выработки и потребления мощности.

Полученные результаты были подтверждены экспериментальным путем на лабораторной установке. При этом снимались зависимости мощностей ротора и статора от скорости вращения. Эксперимент проводился при предельно достижимом на данной установке пониженном напряжении. Моделирование было проведено с таким же пониженным напряжением. Обобщенные результаты эксперимента и моделирования представлены на рис. 4.

Расчет коэффициента полезного действия генераторной установки на базе асинхронной электрической машины с фазным ротором проводился по формуле:

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{P_1 - P_2}{P_{\text{мех}}}. \quad (3)$$

Исследования показали тенденцию снижения КПД при уменьшении скорости и момента машины, что наглядно отражает приведенный на рис. 5 трехосевой объемный график $\eta = f(\omega, M)$.

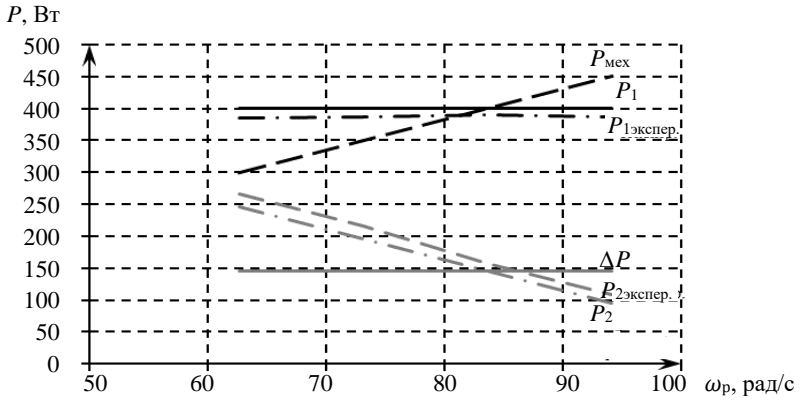


Рис. 4. Обобщенные результаты эксперимента и моделирования

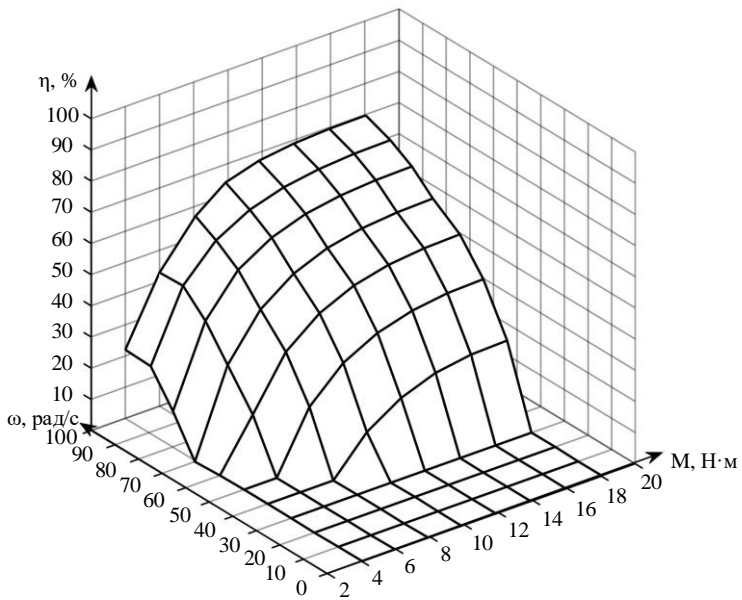


Рис. 5. Зависимость КПД от скорости и момента

У. Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать вывод о том, что диапазон угловой скорости машины, при которой происходит эффективное генерирование мощности, лежит в области околосинхронных угловых скоростей. Для реализации данных режимов работы установки требуется источник питания ротора, работающий на низких частотах, не превышающих 30 Гц.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ №17-48-480492 р.а. «Анализ, математическое моделирование и оптимизация управления электромеханическими системами с электроприводами переменного тока мехатронных устройств, манипуляторов и грузоподъемных механизмов».

© Мещеряков В.Н., 2018

© Муравьев А.А., 2018

© Бойков А.И., 2018

© Пикалов В.В., 2018

Библиографический список

- [1] Мазалов А.А. Адаптивная ветроустановка переменного тока с асинхронным генератором // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3 (104). С. 250-256.
- [2] Мазалов А.А. Адаптивная ветроустановка с машиной переменного тока двойного питания // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 1 (126). С. 26-33.
- [3] Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Возможности машины двойного питания в отношении двухзонного регулирования // Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. № 1. С. 26-29.
- [4] Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Наблюдатель потокосцепления для машины двойного питания, управляемой по статорной и роторной цепям // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. № 11. С. 170-173.
- [5] Мещеряков В. Н., Безденежных Д.В., Башлыков А.М., Абросимов А.С. Способ управления электроприводом переменного тока, Пат. 2456742 РФ, № 2011114789/07 заявл. 14.04.2011; опубл. 20.07.2012. – Бюл. № 20.
- [6] Муравьев А.А., Бойков А.И. Системы управления асинхронной машиной с фазным ротором с вентильными преобразователями в цепи ротора // Материалы XII международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления». Липецк. 2017. С. 159-163.
- [7] Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Способ управления автономным асинхронным генератором, Пат. 2606643 РФ, № 2015135745, заявл. 21.08.2015; опубл. 10.01.2017. – Бюл. № 1.
- [8] Мещеряков В.Н., Мещерякова О.В. Способ управления автономным асинхронным двигателем, Пат. 2539347 РФ, № 2013135394/07, заявл. 26.07.2013; опубл. 20.01.2015. – Бюл. № 2.

- [9] Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Электроэнергетическая установка на базе машины двойного питания с релейной системой управления возбуждения // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 6. 26-32.
- [10] Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Асинхронный генератор на базе машины двойного питания // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 4. С. 45-49.

**V.N. Meshcheryakov, A.A. Muravyev,
A.I. Boikov, V.V. Pikalov**

ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEM BASED ON DOUBLY-FED MACHINE

Lipetsk State Technical University,
Lipetsk, Russia

Abstract. An important direction of improving the efficiency of electrical systems in the composition with wind installations is the development of new energy generation systems, implemented on the basis of asynchronous machines with a phase rotor. The article presents the results of a study of the power generation system, built on the basis of an asynchronous machine with a phase rotor operating in dual – power machine mode at a variable frequency of rotation of the generator shaft for supplying the rotor windings from an adjustable AC source and connecting a stator to a three – phase symmetric active load. The design of the pathogen made on the basis of a voltage inverter with additional elements is considered: a switching key in a DC link connected in series with an inductor and a reverse diode. The computer model of the generator set, implemented using the Matlab Simulink application software package, is presented. Based on the results of studies using a computer model, graphs of the energy balance in the system were constructed. The indicators of the energy efficiency of the system were studied and a three – axis volumetric graph was constructed characterizing the effects of speed and moment on the generator shaft on the system efficiency. Experimental studies of the generator set with the developed system of excitation of the rotor circuit were carried out. The experimental setup is based on the MTH – 011 – 6 electrical machine with the phase rotor. Experimental studies of energy processes in the generator set confirmed the results of computer simulation.

Keywords: asynchronous generator, computer simulation, dual power machine, energy balance, energy efficiency, optimal mode.

References

- [1] A.A. Mazalov. Adaptive wind power plant of alternating current with inductor motor // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, vol. 3, no. 104, pp. 250-256, 2010.
- [2] A.A. Mazalov. Adaptive wind power plant with alternating current double fed induction machine // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, vol. 1, no. 126, pp. 26-33, 2012.

- [3] V.N. Meshcheryakov and D.V. Bezdenezhnykh. Capabilities of the double-fed machine in a relationship dual-zone regulation // *Electrical engineering complexes and control systems*, no. 1, pp. 26-29, 2010.
- [4] V.N. Meshcheryakov and D.V. Bezdenezhnykh. Flux estimator for double-inverter-fed machine // *Bulletin of Voronezh State Technical University*, vol. 11, pp. 170-173, 2010.
- [5] V.N. Meshcheryakov, D.V. Bezdenezhnykh, A.M. Bashlykov, A.S. Abrosimov. The control method of AC drive // R.F. Patent 2606643. Jan. 10, 2017.
- [6] A.A. Muravyev and A.I. Boykov. Control systems of an asynchronous machine with a phase rotor with valve converters in the rotor circuit // in *proc. XII international scientific and practical conference «Modern complex control systems»*, Lipetsk, 2017, pp. 159-163.
- [7] V.N. Meshcheryakov and A.A. Muravyev. The control method of an autonomous asynchronous generator // R.F. Patent 2606643, Jan. 10, 2017.
- [8] V.N. Meshcheryakov and O.V. Meshcheryakova. The control method of an autonomous asynchronous motor // R.F. Patent 2539347, Jan. 20, 2015.
- [9] V.N. Meshcheryakov and A.A. Muravyev. // *Electricity generating unit based on double-fed machine with a relay excitation control system* // *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, vol. 6, pp. 26-32, 2017.
- [10] V.N. Meshcheryakov and A. A. Muravyev. An induction generator based on a doubly-fed machine // *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, vol. 4, pp. 45-49, 2016.

УДК 621.3

П.В. Терентьев, Д.А. Филатов, Д.Ю. Браташов**УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
НЕПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

Один из способов оценки энергетической эффективности электротехнических комплексов является сравнение фактического годового электропотребления с нормативным значением. В расчете годового нормативного расхода электроэнергии участвует коэффициент использования электроприемников. В настоящее время для ряда современных и распространенных образцов электрооборудования информация о коэффициенте использования отсутствует. Статья посвящена определению коэффициентов использования для современной офисной техники. Для трех рабочих мест, оснащенных офисной техникой, проведены исследования среднего и максимального режимов работы. Для проведения измерений использованы анализаторы качества электроэнергии Fluke 434. Принято допущения о нормальном законе распределении объемов потребления электрической энергии. Установлено, что представленные в технической литературе значения коэффициентов использования отличаются от результатов исследования. Реальные коэффициенты использования получились в два раза меньше нормативных значений, что свидетельствует о завышении нормативной величины электропотребления.

Ключевые слова: коэффициент использования, нормальный закон распределения, нормирование, электропотребление, энергетическая эффективность.

1. Введение

К непромышленным объектам относятся объекты гражданского строительства, которые подразделяются на объекты жилого и общественного назначения (офисы, школы, детские сады и т. п.) Эффективность использования электроэнергии организациями можно определить путем сравнения фактического годового расхода электрической энергии с нормативным электропотреблением организации.

При достаточно полном объеме исходной информации годовой расчетно-нормативный расход электроэнергии организации определяется по выражению [1-3]:

$$W_{\Sigma r}^n = W_{o.r}^n + W_{c.r}^n, \quad (1)$$

где $W_{\text{о.г.}}^{\text{н}}$ – годовой нормативный расход электроэнергии системой освещения, кВт·ч; $W_{\text{с.г.}}^{\text{н}}$ – годовой нормативный расход электроэнергии силовой нагрузкой, кВт·ч.

Годовой нормативный расход активной электроэнергии силовой нагрузкой бюджетной организации рекомендуется определять по выражению:

$$W_{\text{с.г.}}^{\text{н}} = P_{\text{ср.с}} \cdot T_{\text{г}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ср.с}}$ – средняя мощность силовых электроприемников организации, кВт; $T_{\text{г}}$ – годовой фонд рабочего времени, ч.

$$P_{\text{ср.с}} = \sum_{j=1}^m (P_{\text{уст.}j} \cdot n_j \cdot K_{\text{и}j}), \quad (3)$$

где m – количество групп однотипного силового оборудования; $P_{\text{уст.}j}$ – установленная мощность электроприемника j -й группы, кВт; n_j – количество электроприемников j -й группы, шт.; $K_{\text{и}j}$ – коэффициент использования электроприемников j -й группы, о.е.

Годовой фонд рабочего времени организации может быть определен по выражению:

$$T_{\text{г}} = (365 - m_{\text{г}}) \cdot n \cdot T_{\text{см}} \cdot k_{\text{р}} - T_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где $m_{\text{г}}$ – число нерабочих дней в году; n – число смен; $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $k_{\text{р}}$ – коэффициент, корректирующий незапланированные перерывы ($k_{\text{р}} = 0,96 - 0,98$); $T_{\text{пр}}$ – годовое число часов, на которые сокращена продолжительность работы в предпраздничные и выходные дни.

Годовой фонд рабочего времени организации можно принимать согласно табл. 1.

Таблица 1.
Годовой фонд рабочего времени организации

Продолжительность смены, ч.	Годовой фонд рабочего времени, ч., при числе смен		
	одна	две	три
8	2250	4500	6400
7	2000	3950	5870

III. Материалы и методы

В последнее время появилось электрооборудование, для которого отсутствуют коэффициенты использования. Для определения коэффициента использования мощности ($K_{и}$) современной офисной техники были проведены исследования стандартного набора оборудования.

Основной нагрузкой являются персональные компьютеры. В расчетах принято, что наиболее мощными электроприемниками в составе компьютера являются блок питания и монитор. Для исследования было выбрано 3 рабочих места. Стандартным потребителем административных зданий является также копировально-множительная оргтехника. Еще два электроприемника, рассматривавшиеся в анализе – СВЧ-печь и кондиционер. В отличие от компьютерной техники, режим их работы кратковременный и сезонный (последний характерен для кондиционера), но мощность достаточно большая. Параметры всех нагрузок сведены в табл. 2.

Оценено количество наблюдений (объем выборки) необходимых для получения погрешности расчетов коэффициента использования менее 5%. Основное допущение, что закон распределения объемов потребления электрической энергии отдельными объектами – нормальный [4].

Таблица 2.
Параметры нагрузки

Наименование	Состав электроприемников
Рабочее место №1 («новый компьютер»)	Персональный компьютер образца 2010 года: Центральный процессор AMD Athlon II X3 425 2,7 ГГц Блок питания Power Vox PB 400W мощностью 400 Вт
	Монитор LG Flatron W2253S: Год выпуска – 2010
Рабочее место №2 («старый компьютер»)	Персональный компьютер образца 2004 года: Центральный процессор Intel Celeron 2,4 ГГц. Блок питания SPARKMAN SM-250W мощностью 250 Вт
	Монитор Samsung 763DFX: Год выпуска – 2003
Рабочее место №3 («новый компьютер с ИБП»)	Персональный компьютер образца 2010 года: Центральный процессор AMD Athlon II X3 425 2,7 ГГц, Блок питания Power Man IPS 450T7 – 0 мощностью 450 Вт.
	Монитор LG Flatron E2441: Год выпуска – 2011
	Источник бесперебойного питания APC 500VA: Мощность 500 ВА (300 Вт).
Презентационный стенд	Ноутбук Dell Inspiron 2200 образца 2001 года: Центральный процессор Intel Pentium M 1,5 ГГц, Блок питания SPARKMAN SM – 250W мощностью 250 Вт
	Проектор ASK Impression A8+
	Источник бесперебойного питания Ippon smart power pro 1000: Мощность 1000 ВА

Продолжение таблицы 2.

Наименование	Состав электроприемников
Копировально-множительная оргтехника	МФУ Kyocera TASKAlfa 180: максимальный выходной ток блока питания 5,1 А.
	Принтер цветной лазерный: Модель – Samsung CLP 320; Год выпуска – 2011; Максимальный входной ток блока питания 2,5 А.
	Принтер ч/б лазерный: Модель – Hewlett – Packard P1102; Год выпуска – 2010; Максимальный входной ток блока питания 2,5 А.
СВЧ-печь	Модель – Samsung MW73VR: максимальная потребляемая мощность 1150 Вт; максимальная мощность микроволнового излучения – 800 Вт
Кондиционер оконный	Модель – Samsung AW 05 MDYEB: Выдаваемая мощность при охлаждении – 1520 Вт; Потребляемая мощность при охлаждении – 580 Вт

Необходимое количество наблюдений (n) определяется заданной допустимой ошибкой ($m_{\text{доп}}$) и отношением «максимальной» ошибки к средней квадратической ошибке – (t), устанавливаемой в зависимости от требуемой достоверности, что действительная ошибка не превзойдет «максимальную». При нормальном распределении вероятность того, что действительная ошибка не превышает среднюю абсолютную ошибку, составляет 0,954 при $t = 2$; 0,997 при $t = 3$. Необходимое количество наблюдений определяется по формуле:

$$n = \left(\frac{t \cdot \sigma_x}{m_{\text{доп}}} \right)^2, \quad (5)$$

где σ_x – среднее квадратическое отклонение.

В табл. 3 представлено необходимое количество выборки исследуемых электроприемников для получения погрешности расчетов менее 5 %.

Таблица 3.

Необходимое количество выборки исследуемых электроприемников

Наименование электроприемника	среднее квадратическое отклонение σ_x , о.е.	Погрешность расчета, %	Необходимое количество выборки, шт.
Рабочее место №1	0,0333	5	4
Рабочее место №2	0,01667	5	1
Рабочее место №3	0,01667	5	1
МФУ копир/принтер	0,1	5	36

IV. Экспериментальные данные

Анализ электропотребления офисной техники проведен анализатором качества электроэнергии Fluke 434 путем ряда замеров. Относительная погрешность измерения от $\pm 0,1\%$ до $\pm 1\%$, в зависимости от измеряемого показателя.

Результаты замеров приведены в табл. 4.

Таблица 4.
Результаты анализа рассматриваемой офисной техники

Наименование оборудования		Средний режим работы					Максимальный режим работы				
		$P_{\text{ном}}$, кВт	$P_{\text{факт}}$, кВт	K_3	$K_{\text{в}}$	$K_{\text{и}}$	$P_{\text{ном}}$, кВт	$P_{\text{факт}}$, кВт	K_3	$K_{\text{в}}$	$K_{\text{и}}$
Рабочее место №1	Компьютер	0,4	0,12	0,273	2ч/8ч= 0,25	0,07	0,4	0,22	0,5	6ч/8ч= 0,75	0,38
	Монитор	0,04					0,04				
Итого:		0,44	0,12	0,273	0,25	0,07	0,44	0,22	0,5	0,75	0,38
Рабочее место №2	Компьютер	0,25	0,12	0,363	2ч/8ч= 0,25	0,09	0,25	0,17	0,514	6ч/8ч= 0,75	0,39
	Монитор	0,081					0,081				
Итого:		0,331	0,12	0,363	0,25	0,22	0,331	0,17	0,514	0,75	0,39
Рабочее место №3 (с ИБП)	Компьютер	0,45	0,13	0,274	2ч/8ч= 0,25	0,07	0,45	0,17	0,358	6ч/8ч= 0,75	0,27
	Монитор	0,025					0,025				
Итого:		0,475	0,13	0,274	0,25	0,07	0,475	0,17	0,358	0,75	0,27
Презентационный стенд	Ноутбук	0,25	0,26	0,52	2ч/8ч= 0,25	0,13	0,25	0,26	0,52	6ч/8ч= 0,75	0,39
	Проектор	0,25					0,25				
Итого:		0,5	0,26	0,52	0,25	0,13	0,5	0,26	0,52	0,75	0,39
МФУ копир/принтер		0,424	0,47 печать	1,11	1ч/8ч= 0,125	0,14	0,424	0,92 копирование	2,17	1ч/8ч= 0,125	0,27
Принтер цветной лазерный		0,35	0,83 разогрев	2,37	1ч/8ч= 0,125	0,3	-	-	-	-	-
Принтер ч/б лазерный		0,36	0,5 разогрев	1,39	1ч/8ч= 0,125	0,17	0,36	0,35 печать	0,97	1ч/8ч= 0,125	0,12
СВЧ-печь		1,150	1,25	1,09	1ч/8ч= 0,125	0,14	-	-	-	-	-
Кондиционер		-	-	-	-	-	0,58	0,54 тах охлаждение	0,93	4ч/8ч= 0,5	0,47

Необходимо отметить, для рассматриваемых рабочих мест были исследованы средний и максимальный режимы работы, в зависимости от загрузки оборудования. Величины коэффициентов включения для различных режимов были приняты на основе анализа режимов работы оборудования. В табл. 5 приведено сравнение коэффициента использования мощности ($K_{и}$) современной офисной техники и данные $K_{и}$ из справочной литературы [5-10].

Таблица 5.

Коэффициенты использования мощности ($K_{и}$) офисной техники

Наименование оборудования	Средний режим работы	Максимальный режим работы	$K_{и}$ из справочной литературы [1], [11] *
	$K_{и}$	$K_{и}$	
Компьютер	0,07 - 0,09	0,27 - 0,39	0,4
МФУ	0,14 (режим печати)	0,27 (режим копирования)	-
СВЧ-печь	0,14	0,14	-
Мультимедийная система (ноутбук + проектор)	0,13	0,39	0,4
Принтер цветной лазерный	0,3 (режим разогрева)	0,3 (режим печати)	-
Принтер ч/б лазерный	0,36 (режим разогрева)	0,12 (режим печати)	-
Кондиционер	0,47	0,47	0,7

* Примечание: «-», говорит о том, что данные в справочной литературе по рассматриваемому оборудованию отсутствуют.

V. Выводы

Коэффициенты использования, имеющиеся в технической литературе [1, 11], отличаются от полученных $K_{и}$ при исследовании. Величина реальных коэффициентов использования ориентировочно в два раза меньше, чем в распространенных ныне методиках энергоаудита и нормирования потребления электроэнергии [1, 11]. Завышенная величина коэффициента использования приводит к завышению нормативной величины электропотребления в 1,2-1,5 раза.

© Терентьев П.В., 2018

© Филатов Д.А., 2018

© Браташов Д.Ю., 2018

Библиографический список

- [1] Вагин Г.Я., Дудникова Л.В., Зенютич Е.А., Лоскутов А.Б., Солнцев Е.Б. Методика проведения энергетических обследований (энергоаудита) образовательных учреждений. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2009. – 188 с.
- [2] Карпов Ф.Ф. Расчет городских распределительных электрических сетей. М.: Энергия, 1968. – 224 с.
- [3] Наумов А.Л. Энергоэффективность инженерного оборудования // ЭСКО. 2013. № 5. С. 22-25.
- [4] Солнцев Е.Б., Терентьев П.В., Шешотова Н.В. Определение характеристик закона распределения коэффициента использования // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, 2013. С. 47-52.
- [5] Бугров С.А. Исследование электропотребления и разработка методов нормирования и повышения эффективности использования электроэнергии в образовательных учреждениях: автореф. дис. канд. техн. наук., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, 2011. – 19 с.
- [6] Лоскутов А.Б., Солнцев Е.Б., Петрицкий С.А., Терентьев П.В. Методика интегральной оценки уровня энергоэффективности непромышленных объектов // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3 (30). С. 11.
- [7] Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2004. – 214 с.
- [8] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [9] Терентьев П. В. Исследование качества и повышение эффективности использования электроэнергии в электротехнических комплексах служебных и жилых зданий: автореф. дисс. канд. техн. наук., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, 2014. – 19 с.
- [10] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996. – 752 с.
- [11] Методические указания по нормированию потребления тепловой и электрической энергии в учреждениях и организациях министерств образования, культуры, здравоохранения, торговли, труда и социальной защиты. Разработано специалистами научно-исследовательского и проектного республиканского унитарного предприятия «БЕЛТЭИ»; производственного республиканского унитарного предприятия «Белэнергосбережение», Минск, 2003. – 82 с.

P.V. Terentiev, D.A. Filatov, D.U. Bratashov

**IMPROVEMENT OF POWER CAPACITY
UTILIZATION FACTOR OF NON INDUSTRIAL OBJECTS
ELECTRIC EQUIPMENT**

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. One way to assess the energy efficiency of electrical systems is to compare actual annual electricity consumption with a standard value. In the calculation of the annual regulatory energy consumption is the utilization of power consumers. Currently, for a number of modern and common samples of electrical equipment information on the utilization rate is missing. The article is devoted to the definition of power capacity utilization factor for modern office equipment. For three workplaces equipped with office equipment, studies of the average and maximum modes of operation were carried out. Fluke 434 power quality analyzers were used for the measurements. Assumptions about the normal law of the distribution of electrical energy consumption were adopted. It is established that the values of the utilization factors presented in the technical literature differ from the results of the study. The actual utilization factors turned out to be 2 times less than the standard values, which indicates an overestimation of the standard value of power consumption.

Keywords: energy efficiency, normal distribution law, power consumption, rationing, power capacity utilization factor.

References

- [1] G.Ya. Vagin, L.V. Dudnikova, E.A. Zenyutich, A.B. Loskutov and E.B. Solntsev, Methodology for conducting energy audits (energy audit) of educational institutions. N. Novgorod: NNSTU, 2009.
- [2] F.F. Karpov, Calculation of urban electrical distribution networks. Moscow: Energy, 1968.
- [3] A.L. Naumov. Energy efficiency engineering equipment // ESCO, vol. 5, pp. 22-25, 2013.
- [4] E.B. Solntsev, P.V. Terentyev and N.V. Sheshotova. Characterization of the law of distribution of the utilization coefficient // in proc. Actual problems of electric power industry, NNSTU, N. Novgorod, 2013, pp. 47-52.
- [5] S.A. Bugrov, The study of electricity consumption and the development of methods for rationing and improving the efficiency of electricity use in educational institutions // Cand. S. thesis, NNSTU, N. Novgorod, Russia, 2011.
- [6] A.B. Loskutov, E.B. Solntsev, S.A. Petritsky and P.V. Terentyev. Methods of integrated assessment of the energy efficiency level of non-industrial objects // Engineering journal of Don, vol. 3, no. 30, p. 11, 2014.

-
- [7] G.Ya. Vagin, A.B. Loskutov and A.A. Sevostyanov, *Electromagnetic compatibility in the power industry*. N. Novgorod: NNSTU, 2004.
 - [8] *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, EN 50160-2010 ed. 3.0, July 2010.
 - [9] P.V. Terentiev, *Study of the quality and increase of the efficiency of using electric power in electrical engineering complexes of office and residential buildings* // *Cand. of Tech. S. thesis*, NNSTU, N. Novgorod, 2014.
 - [10] L.A. Bessonov, *Theoretical foundations of electrical engineering*. Moscow: Higher School, 1996.
 - [11] *Guidelines for the rationing of the consumption of heat and electricity in institutions and organizations of the ministries of education, culture, health, trade, labor and social protection*. Developed by the specialists of the research and project republican unitary enterprise «BELTEI»; Production Republican Unitary Enterprise «Belenergosberezhenie», Minsk, 2003.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.31

Е.Б. Солнцев, С.А. Петрицкий, С.Н. Юртаев

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Процесс перехода к цифровой энергетике связан с внедрением в электро-технические системы силовых управляемых устройств, основанных на современной полупроводниковой элементной базе. В статье рассмотрен тиристорный регулятор величины и фазы напряжения, являющийся фазоповоротным устройством и регулирующий параметры сети. Работа данного устройства может отрицательно сказываться на показателях качества электроэнергии. Статья посвящена исследованию искажений синусоидальности кривой тока и напряжения, вызванных работой трансформаторно-тиристорных регуляторов величины и фазы напряжения в распределительных сетях среднего напряжения. Исследования проведены с помощью разработанной в среде Matlab Simulink модели устройства. Для режима продольно-поперечного регулирования получены осциллограммы фазного и линейного напряжений. Установлено, что работа устройства вызывает в сети искажения гармонического состава тока и напряжения. Однако величина искажения не превышает допустимых значений. Корректность имитационного моделирования подтверждена совпадением полученных результатов с результатами аналитического расчета.

Ключевые слова: имитационное моделирование, качество электроэнергии, несинусоидальность напряжения, тиристорный регулятор напряжения, фаза напряжения.

1. Введение

В настоящее время во всех отраслях промышленности, в том числе, и в электроэнергетике, активно внедряются и используются различные типы устройств, основанные на современной полупроводниковой и микропроцессорной технике. С развитием преобразовательной техники на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей (IGBT, GTO, IGCT),

а также мощных тиристоров, рассчитанных на применение в сетях напряжением 6, 10 кВ, появляются новые возможности контроля и управления, защиты, преобразования параметров и различные недоступные ранее функции и возможности [1, 2]. Все эти устройства постепенно преобразуют функции электрической сети из «пассивной» в «активную», по сути, реализуют концепцию активно-адаптивных сетей [3-5].

Силовые управляемые устройства при этом играют одну из решающих ролей в развитии активно-адаптивных сетей [3, 6]. Их можно разделить на следующие основные группы:

- устройства компенсации (регулировании) реактивной мощности, параллельного включения;
- устройства, регулирующие параметры сети, последовательного включения;
- устройства сочетающие функции первых двух групп, продольно-поперечного включения;
- устройства ограничения токов короткого замыкания;
- устройства преобразующие род тока;
- накопители энергии большой емкости.

В данной статье рассмотрено устройство, регулирующее параметры сети – тиристорный регулятор величины и фазы напряжения. Это одна из разновидностей фазопоротных устройств. Фазопоротные устройства предназначены для перераспределения потоков мощности, по параллельным ЛЭП, повышения пропускной способности ЛЭП, поддержание заданного уровня напряжения в конце ЛЭП [4-7].

Как следует из названия, в этом устройстве используются тиристорные ключи. Это и вызывает появление гармонических искажений тока и напряжения в сети, где будут использоваться данные устройства.

II. Материалы и методы

Целью разработки модели является анализ влияния тиристорного регулятора величины и фазы напряжения на уровни высших гармоник в системах электроснабжения, при различных параметрах регулирования и их взаимных комбинациях.

В качестве параметров модели были выбраны пределы регулирования разработанного в НГТУ твердотельного регулятора вольтодобавочного напряжения (ТРВДН). Это устройство представляет собой автоматический тиристорный регулятор величины и фазы напряжения с параллельным и последовательным трансформаторами [11].

Данное устройство предназначено для использования в сети среднего напряжения (6-20 кВ), и обеспечивает регулирование величины выходного напряжения относительно входного в диапазоне $\pm 10\%$ и изменение

угла сдвига основной гармоники выходного напряжения относительно входного в диапазоне $\pm 5^\circ$.

III. Имитационная модель

Для разработки имитационной модели была выбрана графическая среда имитационного моделирования Simulink, позволяющая создавать модели различного уровня сложности, в том числе, с наличием нелинейных элементов.

В модели использовались следующие стандартные блоки среды Simulink: идеальный однофазный источник переменного напряжения, управляемый источник переменного напряжения, последовательная RLC цепь, тиристор, генератор импульсов, а также измерительные блоки тока и измерительный блок напряжения, блок осциллографа, вывод информации в рабочее пространство MATLAB, блок определения действующего значения напряжения и блок отображения информации. Для моделирования логики работы устройства использовалась подсистема, позволяющая создать внутри блока необходимый набор логических устройств и математических операций.

Построение имитационной модели ТРВДН осуществлялось с использованием однофазных источников напряжения, объединенных в трехфазную систему. Схема модели ТРВДН представлена на рис. 1. Модель состоит из пяти основных блоков. Блок 1, отвечающий за моделирование продольного регулирования напряжения; блок 2, отвечающий за поперечное регулирование напряжения; блок 3, подсистема, отвечающая за управление знаком продольной и поперечной добавки напряжения; блок 4, моделирующий сеть, питающую потребителей с возможностью продольного и поперечного регулирования напряжения и блок 5, моделирующий нагрузку. Также модель содержит вспомогательные блоки, позволяющие выводить информацию об угле сдвига напряжения с учетом регулирования, о действующих значениях фазного и линейного напряжения, о величине и форме кривой продольного и поперечного регулирования и прочих параметрах ТРВДН.

Блоки продольного и поперечного регулирования напряжения представляют собой источник переменного напряжения, подключенный с использованием тиристоров на RLC -цепь, моделирующую характер и величину нагрузки. Для задания времени открытия тиристоров используется блок генератора импульсов, время подачи импульсов зависит от заданного угла управления тиристорами. В имитационной модели предусмотрено отдельное управление блоками, отвечающими за продольное и поперечное регулирование напряжения.

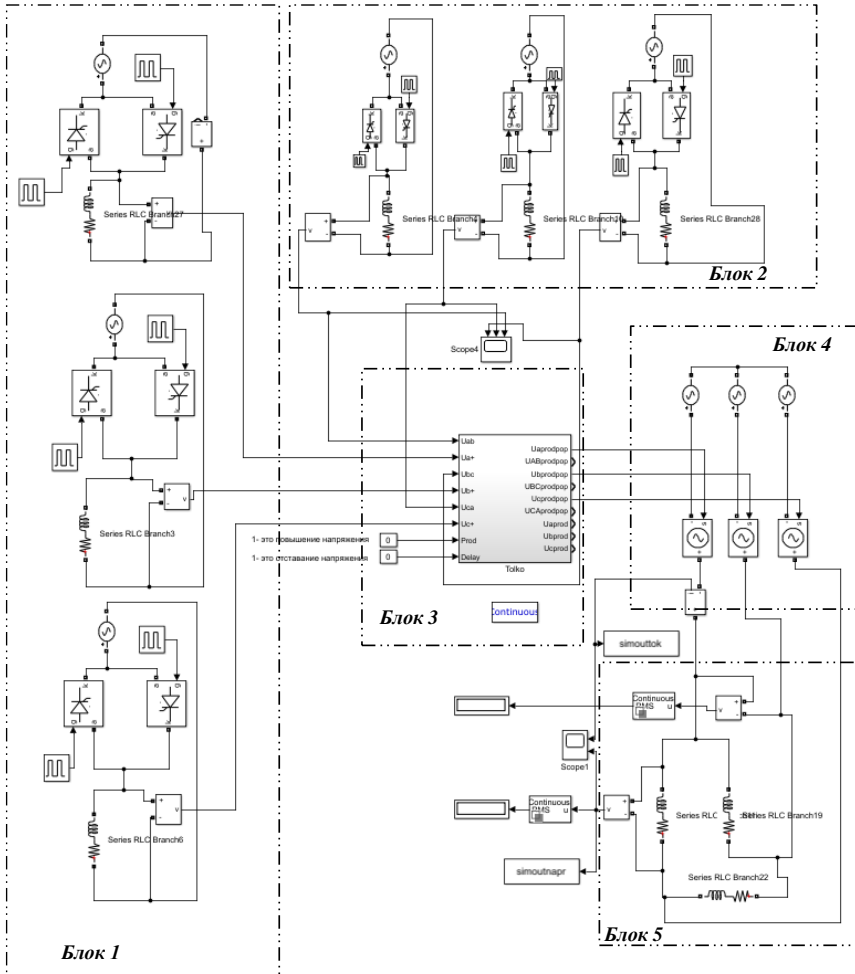


Рис. 1. Имитационная модель ТРВДН в среде MATLAB Simulink

Можно задавать различные углы управления для блока продольного и поперечного регулирования, а также знак регулирования, моделируя тем самым добавку и убавку напряжение, опережение и отставания по фазе. Это позволяет более точно анализировать различные режимы работы устройства, изменяя от 0 до 180 электрических градусов углы управления отдельными блоками. При необходимости возможно моделирование несим-

метричных режимов, когда открытие тиристоров происходит не синхронно. Для работы модели задаются следующие параметры: мощность устройства, мощность нагрузки, номинальное напряжение сети, характер нагрузки (угол между током и напряжением), угол управления тиристорами блока продольного регулирования, угол управления тиристорами блока поперечного регулирования, максимальная величина добавки при продольном регулировании, максимальная величина добавки при поперечном регулировании. Для большей наглядности модели задание области регулирования, а именно увеличение напряжения или его уменьшение, опережение или отставания по фазе, осуществляется вручную в самой модели.

Для упрощения модели принято допущение, вследствие которого в модели не учитывается сопротивление самого устройства и влияние этого сопротивления на уровни гармоник, генерируемых устройством. Это допущение может приводить к некоторому завышению уровня гармоник на выходе ТРВДН, что приемлемо для данной модели, предназначенной для определения предельного уровня гармоник, возникающих в сети при работе ТРВДН.

IV. Результаты исследования

Осциллограммы фазного и линейного напряжения в режиме продольно-поперечного регулирования приведены на рис. 2-5.

В табл. 1 представлены предельные значения коэффициента несинусоидальности напряжения K_U при различных режимах совместной работы модулей продольного и поперечного регулирования, при нагрузке с различными значениями коэффициента мощности.

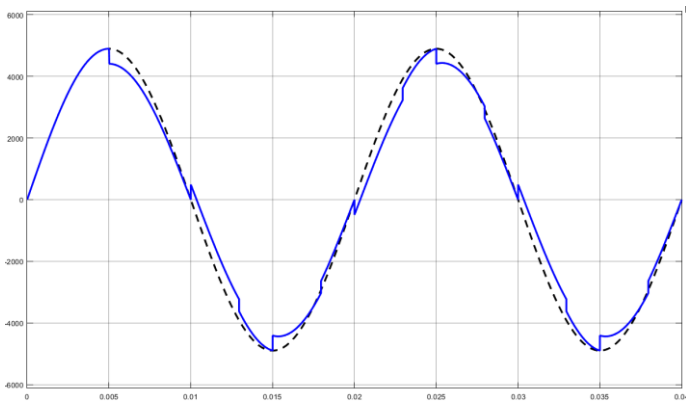


Рис. 2. Напряжение фазы A до и после регулирования ($\cos\varphi = 0,5$, режим понижения/отставания напряжения $\alpha = 90^\circ/90^\circ$)

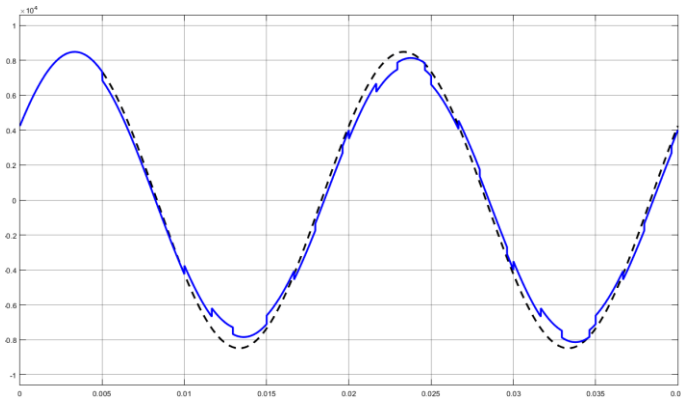


Рис. 3. Линейное напряжение пары фаз *AB* до и после регулирования ($\cos\varphi = 0,5$, режим понижения/отставания напряжения $\alpha = 90^\circ/90^\circ$)

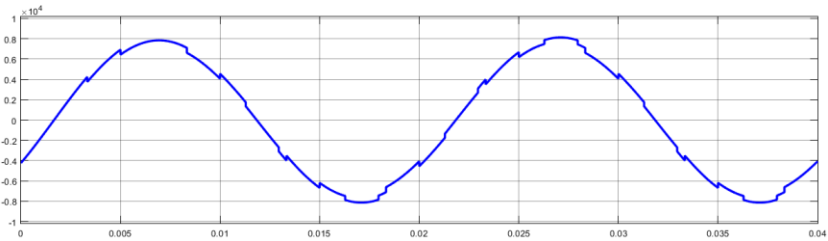


Рис. 4. Осциллограмма линейного напряжения пары фаз *CA* на нагрузке. ($\cos\varphi = 0,5$, режим понижения/отставания напряжения $\alpha = 90^\circ/90^\circ$)

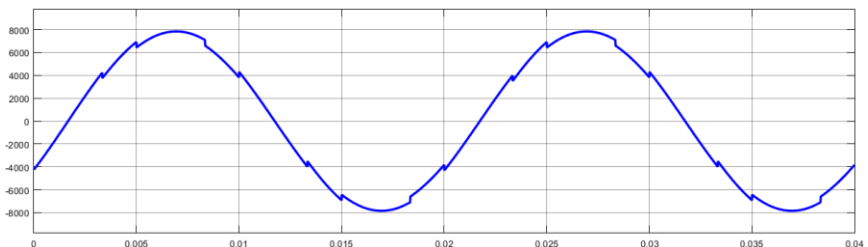


Рис. 5. Осциллограмма линейного напряжения на нагрузке. Режим продольно поперечного регулирования, углы по 90° , понижение напряжения, отставание фазы, $\cos\varphi = 1$

Таблица 1.

Предельные значения коэффициента несинусоидальности напряжения K_U

Наименование режима	$\cos\varphi=1,0$	$\cos\varphi=0,9$	$\cos\varphi=0,9$	$\cos\varphi=0,5$
Повышение/отставание напряжения	3,18	3,6	4,1	4,27
Понижение/опережение напряжения	3,35	3,94	4,43	4,73
Повышение/опережение напряжения	3,06	2,7	3,09	4,09
Понижение/отставание напряжения	3,55	3,12	3,59	4,79

Максимальное значение коэффициента несинусоидальности напряжения K_U при совместной работе модулей продольного и поперечного регулирования составляет 4,79 % и соответствует совместной работе модулей продольного регулирования в режиме понижения с углом управления тиристорами $\alpha = 90^\circ$ и поперечного регулирования в режиме отставания напряжения с углом управления тиристорами $\alpha = 90^\circ$, при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,5$.

В табл. 2 представлены предельные значения коэффициента несинусоидальности тока K_I при различных режимах совместной работы модулей продольного и поперечного регулирования, при нагрузке с различными значениями коэффициента мощности.

Таблица 2.

Предельные значения коэффициента несинусоидальности тока K_I

Наименование режима	$\cos\varphi=1,0$	$\cos\varphi=0,9$	$\cos\varphi=0,9$	$\cos\varphi=0,5$
Повышение/отставание напряжения	3,18	1,52	1,1	0,88
Понижение/опережение напряжения	3,35	1,59	1,19	0,91
Повышение/опережение напряжения	3,06	0,96	0,74	0,79
Понижение/отставание напряжения	3,55	1,11	0,86	0,92

Максимальное значение коэффициента несинусоидальности тока K_I при совместной работе модулей продольного и поперечного регулирования составляет 3,54 %, и соответствует совместной работе модулей продольного регулирования в режиме понижения с углом управления тири-

сторонами $\alpha = 90^\circ$ и поперечного регулирования в режиме отставания напряжения с углом управления тиристорами $\alpha = 120^\circ$, при чисто активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$). При активно-индуктивной нагрузке максимальное значение коэффициента несинусоидальности тока составляет 1,59 % и соответствует совместной работе модулей продольного регулирования в режиме понижения с углом управления тиристорами $\alpha = 90^\circ$ и поперечного регулирования в режиме опережения напряжения с углом управления тиристорами $\alpha = 60^\circ$, при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,9$.

Наибольшие значения коэффициентов гармонических составляющих тока $K_{I(k)}$ и коэффициента несинусоидальности тока K_I наблюдаются при активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$). При активно-индуктивной нагрузке значения коэффициента несинусоидальности тока снижаются вследствие сглаживания бросков тока на индуктивности.

V. Заключение

1. Применение тиристорного регулятора напряжения в сети вызывает искажения гармонического состава тока и напряжения. Но, как показал анализ, эти искажения находятся в пределах требований ГОСТ 32144-2013, при уровнях регулирования $\pm 10\%$ по амплитуде и ± 5 электрических градусов по фазе. Уже при этих параметрах искажения практически достигли максимальных значений требований ГОСТ 32144-2013. При более глубоком регулировании и напряжения, и фазового угла, необходимо будет применить специальных устройств, позволяющих снизить уровень гармонических искажений.

2. Результаты работы имитационной модели практически полностью совпадают с результатами аналитического моделирования данного устройства, представленными авторами ранее [8]. Это подтверждает корректность разработанной модели.

3. Разработанная модель позволяет анализировать работу устройства во всех возможных режимах. При этом переключение режимов и изменение настроек модели занимает минимально возможно время, что значительно снижает трудоемкость выполняемого анализа.

4. Разработанная модель позволяет анализировать различные варианты соединения нагрузки: звезда, треугольник, однофазная нагрузка, несимметричная нагрузка.

5. Модульный принцип построения модели позволяет в дальнейшем легко модифицировать и совершенствовать модель для актуализации и настройки ее под конкретные задачи.

© Солнцев Е.Б., 2018

© Петрицкий С.А., 2018

© Юртаев С.Н., 2018

Библиографический список

- [1] Ситников В.Ф. Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока // Электричество. 2008. № 2. С. 33-38.
- [2] Satoh K., Yamamoto M. The present state of the art in high power semiconductor devices // Proceedings of the IEEE. 2001. № 89 (6). С. 813-821.
- [3] Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 5. С. 25-28.
- [4] Кралин А.А., Асабин А.А., Крюков Е.В. Фазоповоротное устройство для распределительных сетей среднего напряжения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 2 (117). С. 62-67.
- [5] Sosnina E.N., Loskutov A.A., Sevostyanov A. A., Bedretdinov R.Sh. EMC research of transformer – Thyristor regulator 2017 // in proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Latin America (ISGT Latin America 2017), 2017. С. 1-6.
- [6] Добрусин Л.А. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике // Силовая электроника. 2012. Том 4. № 37. С. 60-66.
- [7] Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: Учебное пособие. М.: МЭИ, 2012. – 360 с.
- [8] Солнцев Е.Б., Петрицкий С.А., Юртаев С.Н. Расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети 6-20 кВ с тиристорным регулятором напряжения // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 2. С. 39-52.
- [9] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
- [10] ABB Review: FACTS – solution to power flow control & stability problems. Sweden: ABB Power System AB, 1999.
- [11] Асабин А.А., Верховский С.Я., Соснина Е.Н., Гардин А.И., Бедретдинов Р.Ш., Кисель Д.А. Полупроводниковое фазоповоротное устройство, Пат. 157116; опубл. 2016. – Бюл. № 3.

E.B. Solntsev, S.A. Petritskiy, S.N. Iurtaev

**DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL
OF THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR**

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

Abstract. The process of transition to digital energy is associated with the introduction of controlled power devices based on modern semiconductor components into power systems. The article describes a thyristor regulator of the magnitude and phase of the voltage, which is a phase shifting device and regulates the network parameters. The operation of this device may adversely affect the power quality. The article is devoted to the study of the distortion of the sinusoidal curves of current and voltage caused by the operation of transformer-thyristor regulators of the magnitude and phase of the voltage in the distribution networks of medium voltage. The studies were carried out using the device model developed in Matlab Simulink. Oscillograms of phase and linear voltages were obtained for the mode of longitudinal-transverse regulation. It is established that the operation of the device causes a distortion of the harmonic composition of the current and voltage in the network. However, the magnitude of the distortion does not exceed the permissible values. The correctness of the simulation was confirmed by the coincidence with the results of the analytical calculation.

Keywords: simulation modeling, thyristor voltage regulator, power quality, non-sinusoidal voltage, voltage phase.

References

- [1] V.F. Sitnikov. Power electronics in AC power supply systems // *Elektrichestvo*, vol. 2, pp. 33-38, 2008.
- [2] K. Satoh and M. Jamamoto. The present state of the art in high power semiconductor devices // *IEEE Proc.*, vol. 89, no. 6, pp. 813-821, June 2001.
- [3] E.N. Sosnina and R.Sh. Bedretdinov. The main directions of development of intelligent electrical networks based on adaptive control // *Electrical equipment: operation and repair*, vol. 5, pp. 25-28, 2012.
- [4] A.A. Kralin, A.A. Asabin and E.V. Kryukov. Phase-turning device for medium-voltage distribution network // *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, vol. 2, no. 117, pp. 62-67, 2017.
- [5] E.N. Sosnina, A.A. Loskutov, A.A. Sevostyanov and R.Sh. Bedretdinov. EMC research of transformer – Thyristor regulator // in proc. 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Latin America, Jan. 2017, pp. 1-6.
- [6] L.A. Dobrusin. Tendencies of use of phase-shifting transformers in power industry // *Power electronics*, vol. 4, no. 37, pp.60-66, 2012.
- [7] A.P. Burman, Yu.K. Rozanov and Yu.G. Shakaryan, *Managing electricity flows and improving the efficiency of electric power systems*. Moscow: MEI, 2012.
- [8] E.B. Solntsev, S.A. Petritsky and S.N. Iurtaev. Design and analytical model of 6 – 20 kV distribution electric network section with thyristor voltage regulator // *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 39-52, 2018.
- [9] *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, EN 50160-2010 ed3.0, July 2010.
- [10] *ABB Review: FACTS – solution to power flow control & stability problems*. Sweden: ABB Power System AB, 1999.
- [11] A.A. Asabin, S.Y. Verkhovsky, E.N. Sosnina, A.I. Gardin, R.Sh. Bedretdinov and D.A. Kisel. Semiconductor phase shifter // R.F. Patent 157116, 2016.

УДК 621.313.13

В.Ф. Стрелков, М.В. Андрюхин**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ
ВРАЩЕНИЯ АНТЕННЫ РЛС**Федеральный научно-производственный центр
«Научно-исследовательский институт радиотехники»

Современное направление развития радиолокационных станций (РЛС) связано с использованием переменной скорости вращения антенны. При этом актуальной является разработка систем управления режимами работы регулируемых электроприводов (РЭП) в составе таких комплексов. В статье описывается предложенная авторами система управления электродвигателем вращения антенны РЛС, которая обеспечивает высокую эффективность работы РЭП в стационарном и нестационарном режимах. Предложенная система управления позволяет сохранить характеристики направленности в секторе сканирования и тем самым позволяет повысить тактико-техническую характеристику РЛС. Представлена имитационная модель электротехнического комплекса, разработанная на основе структурной схемы предложенной системы управления. С помощью имитационной модели установлена взаимосвязь между переменной составляющей мощности, потребляемой электродвигателем при ветровой нагрузке, и скоростью вращения его вала в стационарном режиме работы РЭП.

Ключевые слова: математическая модель, регулируемый электропривод, структура схемы управления электродвигателем, электромагнитные процессы.

1. Введение

Современные радиолокационные станции (РЛС) все чаще проектируются с активными фазированными антенными решетками (АФАР), обеспечивающими электрическое горизонтальное и вертикальное сканирование диаграммы направленности антенны (ДНА) [1-4].

Применение РЛС с переменной скоростью вращения антенны позволяет повысить ее тактико-технические характеристики и технико-экономические показатели электропривода [5, 6]. Актуальной является задача исследования нестационарных процессов в электротехнических комплексах (ЭТК) с переменной скоростью вращения антенны.

Особенностью современных РЛС является то, что в её автономной системе электроснабжения одной из самых мощных нагрузок является регулируемый электропривод (РЭП) вращения антенны. Его потребляемая мощность составляет 20-25% от мощности дизель-генератора.

Известно несколько систем управления РЭП вращения антенн РЛС [7-9]. РЛС является автономным объектом с первичным источником питания – генератором ограниченной мощности. В связи с этим, крайне важно найти рациональный вариант управления режимами работы РЭП, от качественной работы которого зависит эффективность работы всей РЛС.

II. Материалы и методы

В современном ЭТК РЛС выделяются две группы систем. Первая из них состоит из системы автономного электроснабжения (САЭС), системы вращения антенны (СВА), системы импульсного питания (СИП). Для нее характерно изменение параметров потребления (генерирования) электрической энергии, как в стационарном режиме, так и нестационарном режиме при изменении ветровой нагрузки и режимов работы РЛС. Вторая группа, включающая в себя систему вторичного электропитания (СВЭ), систему бесперебойного питания, систему обеспечения тепловых режимов (СОТР), в первом приближении может рассматриваться как постоянная нагрузка (ПН) с неизменной потребляемой мощностью.

Предложена система управления электродвигателем вращения антенны РЛС (рис. 1), обеспечивающая эффективную работу РЭП как в стационарном, так и в нестационарном режимах работы [10]. Нестационарный режим работы наблюдается при резком возрастании нагрузки на валу антенны, что может произойти при мощном порыве ветра.

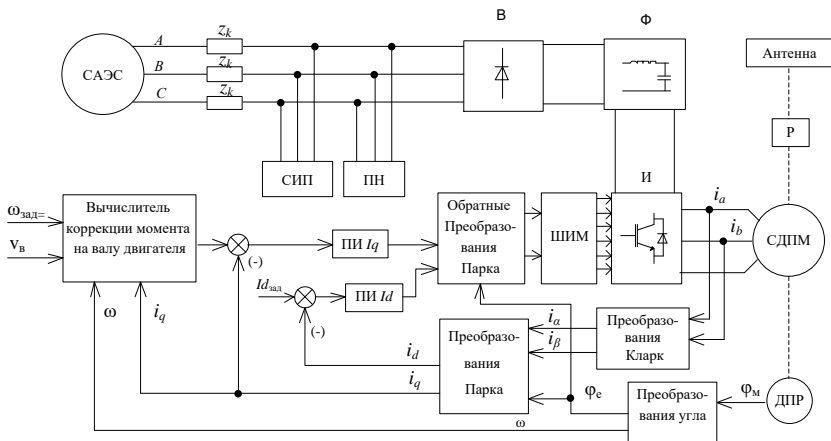


Рис. 1. Структурная схема ЭТК с переменной скоростью вращения антенны

СВА включает в себя регулируемый электропривод (РЭП), редуктор (Р) и антенну. В состав РЭП входят: синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ), выпрямитель (В), фильтр (Ф), инвертор (И), датчик

положения ротора (ДПР), система управления, построенная в синхронно-вращающейся системе координат с подчиненным регулированием параметров, содержащая в себе широтно-импульсный модулятор ШИМ, блоки пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов в контурах токов I_d , I_q и блоки преобразования координат.

Мощность, потребляемая СИП, представляющей собой импульсную нагрузку [11], также величина переменная, зависящая от режимов работы РЛС. Функцию САЭС может выполнять либо трансформатор подстанции, питающийся от общепромышленной сети, либо синхронный генератор дизель-электростанции.

Традиционно СВА обеспечивает постоянную скорость вращения антенны, что, в свою очередь, при ветровой нагрузке, воздействующей на полотно антенны, вызывает появление переменной составляющей момента на валу электродвигателя и потребляемой им мощности [6]. Это ведет к увеличению эквивалентного (среднеквадратичного) момента на валу электродвигателя его расчетной мощности, массы, габаритов и стоимости. Кроме того, неравномерный характер потребления электрической энергии вызывает колебания напряжения питания СВА, снижая электромагнитную совместимость (ЭМС) РЭП и надежность работы всей РЛС. Определенного улучшения указанных показателей можно достичь при переменной скорости вращения вала СДПМ и антенного полотна.

В результате выполненных авторами исследований определена взаимосвязь между переменной составляющей мощности, потребляемой электродвигателем при ветровой нагрузке, и скоростью вращения его вала в стационарном режиме работы РЭП [12]. Установлено, что работа РЭП АФАР с относительно небольшим коэффициентом пульсаций скорости вращения антенны $\delta\omega^*$, допускаемым техническим регламентом эксплуатации РЛС, позволяет в 2,25 раза снизить коэффициент пульсаций потребляемой им мощности δP^* и на 26% уменьшить требуемую величину номинальной мощности электродвигателя РЭП.

Уменьшение пульсаций потребляемой мощности повышает ЭМС РЭП за счет снижения колебаний напряжения в сети ЭТК, что увеличивает надежность (функциональную) и, кроме того, снижает расчетную мощность его силовой полупроводниковой части. Уменьшение номинальной мощности электродвигателя РЭП позволяет снизить его стоимость, массу и габариты и при той же величине нагрузки повысить КПД.

Дальнейшего улучшения характеристик РЭП можно достичь путем еще большего увеличения коэффициента пульсаций $\delta\omega^*$, однако, это приводит к ухудшению тактико-технических характеристик РЛС.

III. Имитационная модель

Предложен способ и устройство управления РЭП антенны РЛС, реализующие в условиях ветровой нагрузки электромеханическое сканирование с постоянной скоростью вращения ДНА [12], что обеспечивает сохранение характеристик направленности в секторе сканирования.

Для этого величину коэффициента пульсаций скорости вращения вала СДПМ и антенны $\delta\omega^*$ поддерживают на уровне, при котором коэффициент пульсаций мощности $\delta P^* \approx 0$, для чего в систему управления РЭП введен вычислитель коррекции момента на валу СДПМ. Вычислитель формирует сигнал, воздействующий на инвертор РЭП, который пропорционален переменной составляющей момента СДПМ и находится в противофазе с сигналом, пропорциональным переменной составляющей момента сопротивления на его валу. Одновременно формируется сигнал, подаваемый на устройство управления, реализующие электронное сканирование ДНА с переменной скоростью в противофазе с изменением скорости вращения АФАР.

Для выявления особенностей работы ЭТК в нестационарных режимах работы и установления базовых соотношений для расчета его параметров при совмещенном сканировании, выполнено исследование электромагнитных процессов в нем при переменной скорости вращения вала СДПМ.

С учетом сложной зависимости момента сопротивления на валу СДПМ от скорости ветра, скорости вращения антенны и ее геометрии, а также принимая во внимание высокий порядок системы дифференциальных уравнений, описывающих работу ЭТК, в качестве математического аппарата был выбран численный метод расчета с использованием имитационных моделей пакета Matlab Simulink.

Имитационная модель построена в соответствии с ее функциональной схемой, приведенной на рис. 1. Блоки прямого и обратного преобразования Парка, преобразования Кларк, ШИМ и другие реализованы стандартными элементами библиотеки пакета Simulink. Структурная схема вычислителя коррекции момента на валу СДПМ дана на рис. 2.

Коэффициенты пульсаций скорости вала $\delta\omega^*$ и пульсаций мощности δP^* в стационарном режиме работы рассчитываются, в общем случае, по формуле коэффициента пульсаций сложной периодической функции $f(t)$ [13]:

$$\delta F^* = \frac{\sqrt{F_{RMS}^2 - F_{MEAN}^2}}{F_{MEAN}}, \quad (1)$$

где F_{RMS} , F_{MEAN} – соответственно, среднеквадратичное и среднее на периоде повторяемости, значения периодической функции $f(t)$.

Максимальный допустимый угол Θ_{\max} электрического сканирования РЛС равен $\Theta_{\max} = 45^\circ$. Требуемый угол электрического сканирования ДНА в горизонтальной плоскости определяется по формуле:

$$\Theta_s = \gamma_{\sim} - \gamma_{=}, \quad (2)$$

где $\gamma_{=}$, γ_{\sim} – углы механического сканирования ДНА при постоянной и переменной скорости вращения антенны, соответственно.

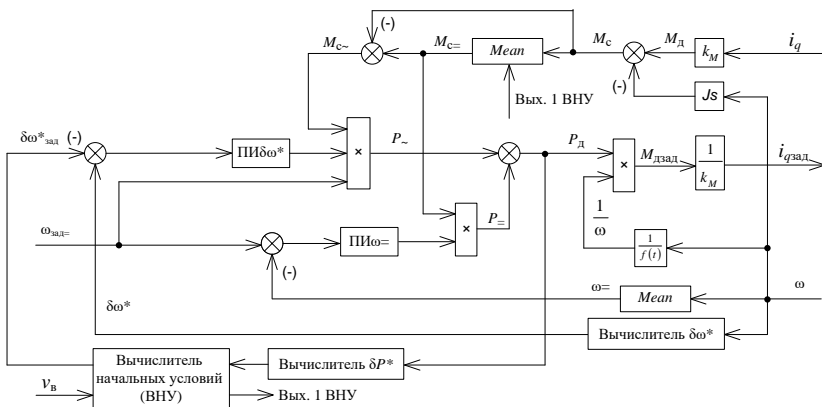


Рис. 2. Структурная схема вычислителя коррекции момента

IV. Результаты

Моделирование электромагнитных процессов выполнено при следующих параметрах РЭП и сети: $\Omega_{зад} = 6 \text{ мин}^{-1}$ ($\Omega_{зад} = 0,63 \text{ рад/с}$); $J = 1,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $i = 500$; $R_k = 0,121 \text{ Ом}$; $X_k = 6,75 \text{ мОм}$. В качестве САЭС использован трансформатор мощностью 75 кВА. Учитывалось также, что момент сопротивления зависит от скоростей ветра и вращения антенны и при $V = 15 \text{ м/с}$, $\Omega_{зад} = 6 \text{ мин}^{-1}$ значения постоянной и переменной составляющей момента сопротивления равны $M_{с=} = 40 \text{ Нм}$, $M_{с\sim} = 50 \text{ Нм}$, соответственно. Максимальный допустимый угол Θ_{\max} электрического сканирования равен $\Theta_{\max} = 45^\circ$. На рис. 3 в - з представлены полученные диаграммы.

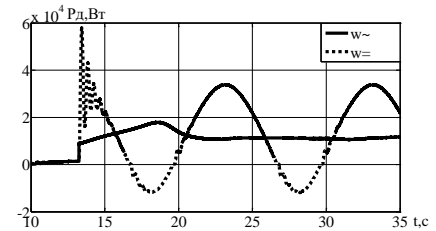
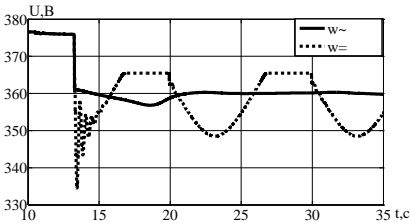
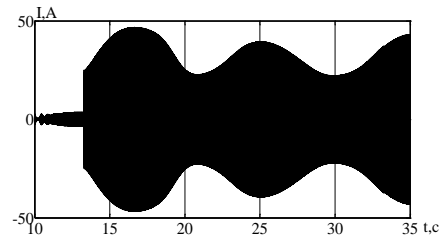
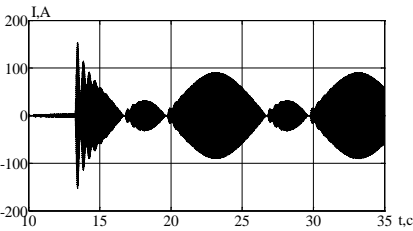
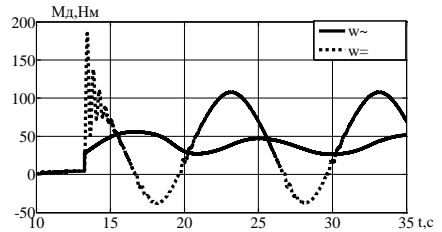
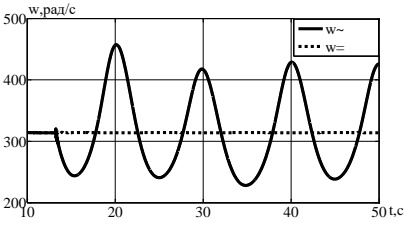
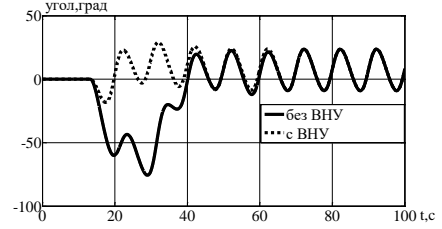
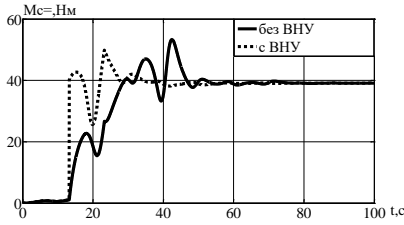


Рис. 3. Временные диаграммы работы ЭТК

- а – среднее значение момента сопротивления; б – угол электронного сканирования Θ_3 ; в, г – скорость вращения вала и момент на СДПМ;
 д, е – ток в фазе СДПМ при постоянной и переменной скорости вращения;
 ж – действующее значение напряжения сети; з – мощность на валу СДПМ

Представленные на рис. 3 временные диаграммы, получены в процессе имитационного моделирования для нестационарного режима работы ЭТК мощности, потребляемой СИП с 0 до 20 кВт, и одновременном возрастании скорости ветра V с 0,5 до 15 м/с и дальнейшем переходе ЭТК в стационарный режим работы РЭП.

Для обеспечения постоянной скорости сканирования ДНА сигнал, пропорциональный требуемому углу электрического сканирования Θ_z (рис. 3, б), подается на управляющие устройства диаграммообразующей системы. При этом величина Θ_z не должна превышать значение Θ_{\max} электрического сканирования ДНА, обеспечиваемого РЛС.

Из сопоставления приведенных результатов следует, что при указанных параметрах РЭП работа РЛС с совмещенным сканированием ДНА в условиях контролируемой пульсации скорости вращения ее антенны устраняется генераторный режим работы РЭП, (рис. 3, г, д, е). Коэффициент пульсаций скорости вращения антенны при скорости ветра 15 м/с не превышает 22% (рис. 3, в). Помимо этого, уменьшаются:

- в 1,6 раза (с 64 Нм до 40 Нм) пульсации момента на валу СДПМ в стационарном режиме и в 6 раз (с 180 Нм до 30 Нм) в нестационарном режиме (рис. 3, г);
- в 1,9 раза (с $I_m = 90$ А до $I_m = 47$ А) амплитуда тока фазы СДПМ в стационарном режиме и в 6 раз (с $I_m = 150$ А до $I_m = 25$ А) в нестационарном (рис. 3, д, е);
- более чем в 10 раз (с 17 В до 1,5 В) колебания напряжения питающей сети в стационарном режиме и в 2,25 раза (с 45 В до 20 В) провал напряжения в нестационарном (рис. 3, ж);
- в 1,7 раза (с 20 кВт до 12 кВт) мощность на валу СДПМ в стационарном режиме и в 6 раз (с 60 кВт до 10 кВт) в нестационарном режиме (рис. 3, з).

В результате исследований установлено, что вычислитель коррекции момента обрабатывает возникшее изменение режима работы примерно за 2-3 оборота антенны (рис. 3 а, б). Это связано с относительно длительным вычислением величины среднего значения $M_{с=}$. При этом угол Θ_z превышает максимально допустимое значение Θ_{\max} (рис. 3, б). В итоге, электрическое сканирование не обеспечивает требуемую ориентацию ДНА, и на протяжении 2-3-х оборотов антенны РЛС не в состоянии обеспечить обнаружение и сопровождение целей, находящихся в зоне ее действия.

Данный недостаток устраняется за счет запоминания установившихся значений $M_{с=}$ при различных скоростях V ветра в ячейке памяти вычислителя начальных условий (ВНУ). Также в ВНУ вводятся заранее определенные величины коэффициента пульсаций скорости $\delta\omega^*$, соответствующие различным скоростям ветра, при которых $\delta P^* \approx 0$ [13].

Значения $M_{с=}$ и $\delta\omega^*$ определяются по результатам моделирования. Зависимости данных величин от скорости ветра при указанных выше параметрах ЭТК приведены на рис. 3 (а, в).

При резком изменении скорости ветра ВНУ задает как необходимый коэффициент пульсаций скорости $\delta\omega^*$, так и необходимое начальное значение $M_{с=}$ (рис. 4, а), что позволяет в нестационарном режиме работы обеспечить значения угла Θ , практически не превышающие его величину в стационарном режиме (рис. 4, б). За счет этого РЛС осуществляет непрерывное обнаружение и сопровождение целей.

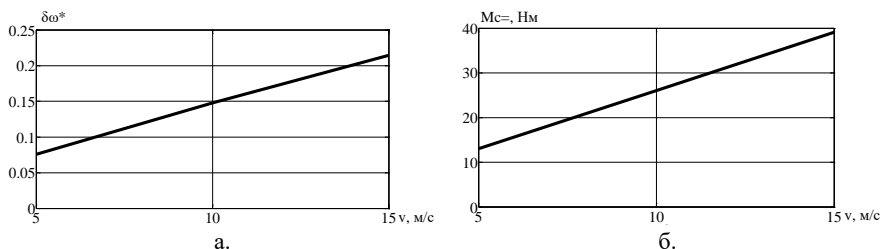


Рис. 5. Зависимости коэффициента пульсаций скорости $\delta\omega^*$ (а) и среднего значения момента сопротивления $M_{с=}$ (б) от скорости ветра

V. Заключение

По результатам исследования можно заключить, что реализация предложенного способа управления с переменной скоростью вращения СДПМ ведет к улучшению технико-экономических показателей РЭП: уменьшению номинальной мощности СДПМ и инвертора, уменьшению стоимости, массы, габаритов, повышению КПД и надежности, а также улучшению его электромагнитной совместимости.

Помимо этого, при достаточной механической прочности АФАР исключается необходимость перехода на пониженные скорости вращения антенны при увеличении ветровой нагрузки, что улучшает тактико-технические характеристики РЛС: скорость обзора, точность определения координат цели, надежность сопровождения высокоскоростных целей.

© Стрелков В.Ф., 2018
© Андрухин М.В., 2018

Библиографический список

- [1] Воскресенский Д.И., Канащенков А.И. Активные фазированные антенные решетки. М: Радиотехника, 2004. – 488 с.
- [2] Бахрах Л.Д. Антенны с электрическим сканированием. М.: Введение в теорию.

2001. – 250 с.
- [3] Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. – 446 с.
- [4] Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
- [5] Казаринова Ю.М. Радиотехнические системы. М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
- [6] Хватов С.В., Стрелков В.Ф., Тетенькин Л.В. Оптимизация режимов работы электроприводов вращения антенно-мачтовых устройств РЛС // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 3. Ч. 3. С. 186-190.
- [7] Казаринова Ю.М. Радиотехнические системы. М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
- [8] Стрелков В.Ф., Ваняев В.В., Андрюхин М.В., Бобылев И.В. Способ и система управления электродвигателем вращения антенны РЛС, Пат. РФ 2554107, опубл. 27.06.2015. Бюл. № 18.
- [9] Стрелков В.Ф., Андрюхин М В, Ваняев В.В. Электропривод вращения антенны РЛС с переменной скоростью // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 3. С. 78-84.
- [10] Положительное решение по заявке № 2018108333 / Система управления электродвигателем вращения антенны РЛС, 2018.
- [11] Хватов С.В., Стрелков В.Ф., Тетенькин Л.В. Вентильно-машинные системы радиолокационных станций // Приводная техника. 2010. № 3. С. 19-21.
- [12] Андрюхин М.В., Стрелков В.Ф., Ваняев В.В. Имитационная модель электропривода вращения антенны РЛС // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, Том. 2, Саранск, 2014. С. 386-389.
- [13] Андрюхин М.В., Стрелков В.Ф., Андрюхин М.В., Стрелков В.Ф., Ваняев В.В., Титов В.Г. Нестационарные режимы работы вентильно-машинного комплекса РЛС. Известия вузов // Электромеханика. 2016. № 1 (543). С. 56-61.

V. F. Strelkov, M.V. Andruhin

CONTROL SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE FOR RADAR STATION ANTENNA

Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering (NNIIRT),
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The modern direction of development of radar stations is associated with the use of variable speed antenna. At the same time, the development of control systems for the operation modes of adjustable electric drives (AED) as part of such complexes is of current importance. The article describes the proposed control system for the rotation motor of the radar antenna, which ensures high efficiency of the operation of the AED in stationary and non-stationary modes. The proposed control system allows one to

save the directivity in the scanning sector and thereby allows to improve the tactical and technical characteristics of the radar. A simulation model of the electrical complex, developed on the basis of the block diagram of the proposed control system, is presented. The relationship between the variable component of the power consumed by the electric motor under wind load and the speed of rotation of its shaft in the stationary mode of AED operation is established with the help of a simulation model.

Keywords: adjustable electric drives, electric motor control circuit structure, electromagnetic processes, mathematical model.

References

- [1] D.I. Voskresensky and A.I. Kanaschenkov, Active phased antenna arrays. Moscow: Radio Engineering, 2004.
- [2] L.D. Bakhrah, Antennas with electrical scanning. Moscow: Introduction to the theory, 2001.
- [3] R.A. Monzingo and T.W. Miller, Adaptive antenna arrays. Moscow: Radio and communication, 1986.
- [4] D.I. Voskresensky, Microwave devices and antennas. Designing phased antenna arrays. Moscow: Radio engineering, 2012.
- [5] Yu.M. Kazarinova, Radio systems. Moscow: Higher School, 1990.
- [6] S.V. Khvatov, V.F. Strelkov and L.V. Tetenkin. Optimization of the operating modes of the electric rotation of the antenna-mast radar devices // Izvestiya Tula State University, vol. 3, pp. 186-190, 2010.
- [7] Yu.M. Kazarinova, Radio systems. Moscow: Higher School, 1990.
- [8] V.F. Strelkov, V.V. Vanyaev, M.V. Andryukhin and I.V. Bobylev. The method and system of control of the motor of rotation of the radar antenna // R.F. Patent 2554107, June 27, 2015.
- [9] V.F. Strelkov, M.V. Andryukhin and V.V. Vanyaev. The electric drive of the rotation of the radar antenna with variable speed // Bulletin of the Concern air defense «Almaz-Antey», vol. 3, pp.78-84, 2015.
- [10] Positive decision on application 2018108333 / Radar antenna rotation control system, 2018.
- [11] S.V. Khvatov, V.F. Strelkov and L.V. Tetenkin. Ventilatory-machine systems of radar stations // Drive technology, no. 3, pp. 19-21, 2010.
- [12] M.V. Andryukhin, V.F. Strelkov and V.V. Vanyaev. Simulation model of the electric drive of the radar antenna rotation // Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automated electric drive, vol. 2, Saransk, pp. 386-389, 2014.
- [13] M.V. Andryukhin, V.F. Strelkov, M.V. Andryukhin, V.F. Strelkov, V.V. Vanyaev and V.G. Titov. Non-stationary modes of operation of a valve-engine radar complex // News of high schools. Electromechanics, vol. 1, no. 543, pp. 56-61, 2016.

НАШИ АВТОРЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Байков Александр Иванович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; baikov-a-i@yandex.ru

Бойков Андрей Игоревич – ассистент Липецкого государственного технического университета; aboikov2013@gmail.com

Браташов Дмитрий Юрьевич – магистрант Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии; dimanbratashov@mail.ru

Вялкова Светлана Александровна – инженер Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова; mazaeva_sveta@mail.ru

Дарьенков Андрей Борисович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; darenkov@nttu.ru

Кочеганов Дамир Михайлович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; dk402@yandex.ru

Куркин Андрей Александрович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор физико-математических наук; aakurkin@nttu.ru

Лисицкая Наталья Владимировна – ведущий инженер Объединенного института высоких температур РАН; talico@mail.ru

Мещеряков Виктор Николаевич – заведующий кафедрой Липецкого государственного технического университета, доктор технических наук; mesherek@stu.lipetsk.ru

Муравьев Артем Артурович – ассистент Липецкого государственного технического университет; a.murawjow@yandex.ru

Надтока Иван Иванович – профессор Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова, доктор технических наук; ii_nadtoka@mail.ru

Осокин Владимир Леонидович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного инженерно-экономического института, кандидат технических наук; osokinvl@mail.ru

Пикалов Владимир Владимирович – магистрант Липецкого государственного технического университет; wreditels@mail.ru

Самоявчев Иван Сергеевич – начальник отдела Горьковского автомобильного завода (группа ГАЗ), кандидат технических наук, uazmtz@mail.ru

Серебряков Артем Владимирович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; sol10001@mail.ru

Серебряков Александр Сергеевич – профессор Нижегородского государственного инженерно-экономического института, доктор технических наук; serebryakov@ardman.ru

Соснина Елена Николаевна – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; sosnyna@yandex.ru

Терентьев Павел Валерьевич – доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, кандидат технических наук; terentyevpv@inbox.ru

Филатов Дмитрий Алексеевич – доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, кандидат технических наук; filatov230188@mail.ru

Фрид Семен Ефимович – заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии Объединенного института высоких температур РАН, кандидат технических наук; s_frid@oivtran.ru

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Андрюхин Максим Владимирович – инженер Нижегородского научно-исследовательского института радиотехники; farand89@gmail.com

Петрицкий Сергей Александрович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; sa540@mail.ru

Солнцев Евгений Борисович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; sol10001@mail.ru

Стрелков Владимир Федорович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; strelkov.428@mail.ru

Юртаев Сергей Николаевич – доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, кандидат технических наук; sergurt@mail.ru

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION**

**NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 4

Nizhny Novgorod 2018

Smart electrical engineering / NSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2018. № 4. – 115 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor Nizhny Novgorod branch of RUT
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor. H-BRS (Germany)

Electronic version of the journal:

<http://www.ie.nntu.ru>

ISBN

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2018

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS.....	4
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.....	4
S.A. Vyalkov, I.I. Nadtoka Analysis of the noise component of the daily schedules of active power energy systems and meteorofactors at short – term forecasting.....	25
I.S. Samoyavchev Estimation of economic indicators of the project of application of CRO – installations in the paint plants of Gorky automobile plant.....	35
A.S. Serebryakov, V.L. Osokin Determination of distance to short circuit point in electric network with two-way power supply.....	43
S.E. Frid, N.V. Lisitskaya Photovoltaic generators for hot water supply	52
D.M. Kochegonov, A.V. Serebryakov Differentiation of loading in autonomous generator complexes based on alternative energy sources...	63
V.N. Meshcheryakov, A.A. Muravyev, A.I. Boikov, V.V. Pikalov Electric power generation system based on doubly – fed machine.....	72
P.V. Terentiev, D.A. Filatov, D.U. Bratashov Improvement of power capacity utilization factor of non industrial objects electric equipment.....	81
POWER ENGINEERING.....	90
E.B. Solntsev, S.A. Petritskiy, S.N. Iurtaev Development of simulation model of thyristor voltage regulator.....	90
V. F. Strelkov, M.V. Andruhin Control system of electric drive for radar station antenna.....	100
Authors	110

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
trenklen@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 29.12.2018. Дата выхода в свет:

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексева. Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.