

УДК 621.658.012.531
DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-47-54

Математическое моделирование учета состояния процесса многомашинной ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям

В. И. Буяльский, кандидат технических наук, государственное автономное образовательное учреждение профессионального образования города Севастополя «Институт развития образования»

Обоснована актуальность способа эффективного управления ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса многомашинной ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям, направленного на минимизацию времени принятия управляющих воздействий перераспределения технологического процесса производства электроэнергии другому потребителю путем наличия оперативной информации о фиксации времени отказа оборудования (генератор, накопительная система электрической энергии), что способствует оптимальному планированию обеспечения требуемого объема электричества объекту потребления в северных широтах.

Предложенный двухуровневый (иерархический) подход позволяет разграничить решения задачи математического моделирования учета состояния процесса многомашинной ветроэнергоустановки нижнего уровня (уровень расположения генераторов, дополнительно подключенных к ветротурбине) и верхнего уровня (уровень расположения ветроустановки, как системы в целом) при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах. В результате проведенного анализа способа эффективного управления ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса генераторов, дополнительно подключенных к ветроэнергоустановке, при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах целесообразным является применение подходов теории игр и математических методов анализа функционирования импульсных систем на основе разностных уравнений. Определены стратегии принятия решений нижнего уровня технологического процесса, обусловленные «природой» (работоспособность или отказ генератора), планировщиком (ремонт или перераспределение генератора) и состоянием фазовой координаты (ремонт, простой, перераспределение или работа генератора). На основе принятых стратегий и использовании ступенчатой функции Хэвисайда $\Phi(t)$ для фиксации времени течения технологического процесса выполнено описание уравнения состояния генераторов дополнительно подключенных к отдельной ветроэнергоустановке, которое обеспечивает оперативный доступ к информации о времени отказа по причине простоя, перераспределения либо ремонта, что способствует оптимальному планированию обеспечения требуемого объема электричества объекту потребления.

Ключевые слова: математическое моделирование, ветротурбина, распределение электроэнергии, технологический процесс, потребитель, принятие решений, состояние процесса

Введение

Необходимость в обеспечении энергоснабжения удаленных регионов Арктической зоны России с помощью независимой генерации электричества имеет тенденцию к возрастанию из-за множества проблем, связанных с эффективностью работы электростанций и электроснабжением в удаленных регионах. В отсутствие централизованного электроснабжения и традиционное обеспечение электроэнергией от устаревших дизельных электрогенераторов и небольших угольных станций в самых северных районах России критически важна роль возобновляемой энергетики и систем накопления энергии в совокупности с интеллектуальной энергетикой и повышением энергоэффективности.

Важность развития региональной энергетики Арктики и Крайнего Севера, в том числе за счет возобновляемых источников энергии, отражена в Энергетической стратегии России на период до 2035 года и в Стратегии экономической безопасности России на период до 2030 года.

При этом использование в ветроэнергоустановках, как правило, одного генератора явно ограничивает как надежность энергоагрегата в целом, так и его КПД при неноминальных режимах работы в результате суровых арктических нагрузок.

Вместе с тем существуют определенные постановки задач, для которых недостаточно широко описаны математические модели или нет готовых и эф-

фективных методов их решения, в частности, математического моделирования обеспечения эффективной и с максимальным коэффициентом полезного действия работу ветроэнергоустановки в широком диапазоне ветровых нагрузок и в заданном графике выдаваемой потребителю электроэнергии. Решение этих проблем возможно лишь при наличии эффективного автоматизированного управления многомашинной ветроэнергетической установкой [1–13].

Целью выполненных исследований является модификация автоматизированного управления ветроэлектрической установкой в составе ветроэлектростанции на основе математического моделирования учета состояния процесса многомашинной ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям, что обеспечивает максимальный коэффициент полезного действия работы многомашинной ветроэнергоустановки в широком диапазоне скорости ветра и в заданном графике выдаваемой потребителю электроэнергии.

Стратегии принятия решений по управлению нижнего уровня технологического процесса

Математическое моделирование учета состояния процесса многомашинной ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах с целью оптимального планирования обеспечения требуемого объема потребляемой элек-

трической энергии может быть определено с помощью стратегий и математических методов анализа функционирования импульсных систем на основе разностных уравнений, связанных с поиском оптимальных управляющих воздействий, описанных в [13]. При этом подход решения данной задачи реализуется на основе двухуровневого (иерархического) технологического процесса, где верхний уровень представляет совокупность ветроагрегатов, а нижний уровень – совокупность генераторов дополнительно подключенных к отдельной ветроэнергоустановке (рис. 1).



Рис. 1. Двухуровневый технологический процесс

Fig. 1. Two-level technological process

Тогда для нижнего уровня технологического процесса стратегия управления будет иметь следующий вид:

1) Стратегия природы: $V = \{0,1\}$, где 1 – работоспособный генератор, 0 – отказ какой-либо генератора.

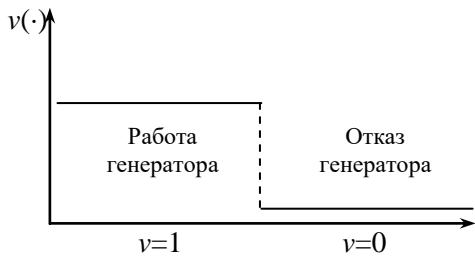


Рис. 2. Вид функции стратегии природы

Fig. 2. Kind of function of strategy of the nature

Вид функции $v = (\cdot)$: ($v(t_*[\cdot]9)$) представлен на рис. 2.

2) Стратегия планировщика: $U = \{0,1\}$, где 0 – ремонт генератора (отказ одного из генераторов), 1 – перераспределение генератора на другого (одного из пяти) потребителя.

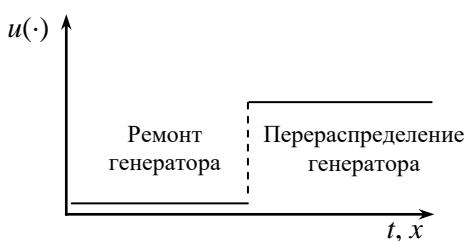


Рис. 3. Вид функции стратегии планировщика

Fig. 3. Kind of function of strategy of the scheduler

Вид функции $u = (\cdot)$: ($u(t_*[\cdot]9)$) представлен на рис. 3.

3) Стратегия состояния процесса: X_i – фазовая координата, характеризующая состояние i -го генератора.

Состояние процесса генератора, характеризуемого фазовой координатой x_i : простой, ремонт, перераспределение, рабочее состояние.

На основе рекомендаций подключения генератора к ветроэнергоустановке в соответствии с изменением скорости ветра, предложенных в [14]: порядок загрузки для i -го оборудования (V_{Gi}) будет иметь вид: $V_{G2} = 13 \text{ м/с}$, $V_{G3} = 16 \text{ м/с}$, $V_{G4} = 19 \text{ м/с}$, $V_{G5} = 22 \text{ м/с}$. Следовательно, простой дополнительного i -го генератора по причине, связанной со слабым ветром, может быть распределен следующим образом: $V_{G2} < 13 \text{ м/с}$, $V_{G3} < 16 \text{ м/с}$, $V_{G4} < 19 \text{ м/с}$, $V_{G5} < 22 \text{ м/с}$. Максимально допустимая скорость ветра при реализации исследуемой ветроэнергоустановки с дроблением мощности составляет: $V_{\max} = 26 \text{ м/с}$.

Принимая во внимание, что скорость ветра подключения первого дополнительного генератора составляет $V_{G2} = 13 \text{ м/с}$ и граничит с номинальной скоростью ветра $V_{\text{ном}} = 12 \text{ м/с}$ (скорость ветра для базового генератора G_1), то стабильность ветрового потока распространяется для работы двух генераторов (G_1, G_2), что обеспечивает возможность снабжения двух потребителей электроэнергией.

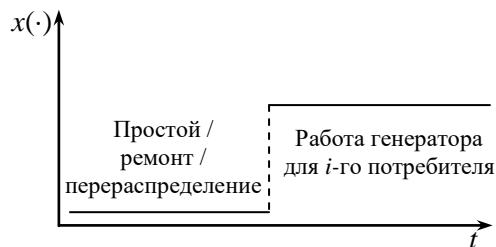


Рис. 4. Работа генератора для i -го потребителя

Fig. 4. Work generator for i th consumer

Перераспределение генератора осуществляется на производство электроэнергии другому потребителю с целью обеспечить требуемый объем потребляемой мощности, таким образом, работа энергоагрегата направлена на производство электроэнергии для первого, второго и третьего потребителя. В то же время количество генераторов исследуемой ветроэнергоустановки составляет пять единиц, что характеризует наличие пяти технологических процессов, а следовательно, пять потребителей (рис. 4).

4) Так как планирование производства требуемого объема электроэнергии должно осуществляться на всю продолжительность суток, то необходимо контролировать окончание этих суток (планирование от $t_* = 0$ до $\vartheta = T_{\text{сут}}$), где $T_{\text{сут}}$ – момент окончания суток). Таким образом, в общую систему уравнений следует ввести уравнение для времени:

$$\frac{dT}{dt} = 1. \quad (1)$$

6) Также следует принять во внимание, что по окончании суток какое-то количество запланированной потребности в электроэнергии для всех потребителей может быть не произведено и за это предусмотрен штраф, следовательно, необходимо контролировать необходимый объем электроэнергии для потребителей № 1, 2, 3, 4 и 5.

7) Потребители № 3, 4 и 5 введены в систему как накопители электроэнергии, так как позволяют обеспечить оптимальную работу ветроэнергоустановки в период простоя генераторов по причине слабого или сильного ветра либо на период планового или аварийного ремонта, расходуя запасенную энергию. Таким образом, оборудование потребителей № 3, 4 и 5 должно перераспределяться в технологические процессы № 1 и 2 по причине ремонта их генераторов или нерабочей энергии ветрового потока (слабый/сильный ветер). В этом случае необходимо ввести идентификатор (индекс), определяющий, какой из технологических процессов (№ 1 или 2) находится в состоянии простоя по причине ремонта, куда необходимо перераспределить оборудование технологических процессов № 3, 4 и 5. Так как в рассматриваемой задаче исследуется производство электроэнергии для пяти потребителей, то введение индексов S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 позволяет решить данную задачу.

Таким образом, значения переменных S_1, S_2, S_3, S_4 и S_5 сопоставляются с соответствующим технологическим процессом следующим образом (переменная S_i , заключенная в скобки принятая для анализа):

$$\begin{aligned} S_5, S_4, S_3, S_2, (S_1) = & \left\{ \begin{array}{l} 1,1,1,1,1 \text{ оборудование входит} \\ \text{в 1-й технологический процесс;} \\ 1,1,0,1,0, \text{ перераспределение} \\ \text{оборудования из 3} \\ \text{в 1-й технологический процесс;} \\ 1,0,1,1,0, \text{ перераспределение} \\ \text{оборудования из 4} \\ \text{в 1-й технологический процесс;} \\ 0,1,1,1,0, \text{ перераспределение} \\ \text{оборудования из 5 в 1-й} \\ \text{технологический процесс;} \\ 1,1,1,1,0, \text{ перераспределение} \\ \text{оборудования из 1 во 2-й} \\ \text{технологический процесс;} \\ 1,1,1,1,1, \text{ оборудование входит} \\ \text{во 2-й технологический процесс;} \\ 1,1,0,0,1, \text{ перераспределение} \\ \text{оборудования из 3 во 2-й} \\ \text{технологический процесс;} \\ 1,0,1,0,1, \text{ перераспределение} \\ \text{оборудования из 4 во 2-й} \\ \text{технологический процесс;} \\ 0,1,1,0,1, \text{ перераспределение} \\ \text{оборудования из 5 во 2-й} \\ \text{технологический процесс;} \\ 1,1,1,0,1, \text{ перераспределение} \\ \text{оборудования из 2} \\ \text{в 1-й технологический процесс;} \end{array} \right. \end{aligned}$$

$$(S_5, S_4, S_3, S_2, S_1) = \begin{cases} 1,1,1,1,1, \text{ оборудование} \\ \text{входит в 3-й, 4-й, в 5-й} \\ \text{технологический процесс;} \\ 1,1,1,0,0, \text{ оборудование} \\ \text{входит в 3-й, 4-й, в 5-й} \\ \text{технологический процес.} \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения состояния генераторов

дополнительно подключенных

к отдельной ветроэнергоустановки

1) Стратегии природы для i -го генератора:

$V_i = 1$ – генератор в рабочем режиме;

$V_i = 0$ – отказ генератора.

2) Стратегии планировщика загрузки генератора:

$u_i = 1$ – перераспределение генератора на производство электроэнергии другому потребителю;

$u_i = 0$ – ремонт генератора при отказе или слабый/сильный ветер;

$c_i = 1$ – перераспределение невозможно;

$c_i = 0$ – перераспределение возможно.

3) Состояние процесса (значения одной из фазовых координат), где

$$x_i = \{ \text{ремонт, простой, перераспределение, работа} \} :$$

$x_i = (-0,5) - i$ -й генератор находится в состоянии ремонта;

$x_i = 0$ – простой генератора по причине слабый/сильный ветер;

$x_i = 0,5$ – перераспределение оборудования (i -й генератор находится в состоянии перераспределения на производство электроэнергии для другого потребителя);

$x_i = 1$ – состояние работы генератора.

Таким образом, в графической интерпретации состояния фазовой координаты представлены на рис. 5:

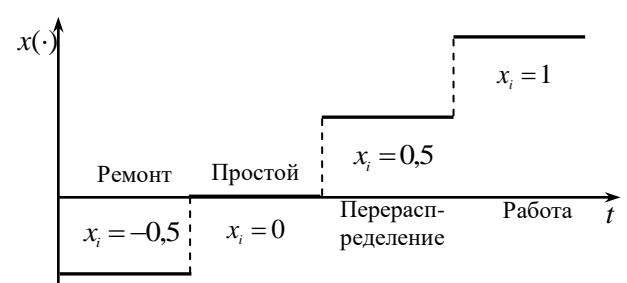


Рис. 5. Состояния фазовой координаты

Fig. 5. Conditions of phase coordinate

При формировании уравнения состояния в обобщенной форме использована ступенчатая функция Хэвисайда $\Phi(\tau)$:

$$\Phi(\tau) = \begin{cases} 0 \text{ при } \tau \leq \tau_0, \\ 1 \text{ при } \tau > \tau_0. \end{cases}$$

Графическая интерпретация ступенчатой функции Хэвисайда $\Phi(\tau)$ представлена на рис. 6.

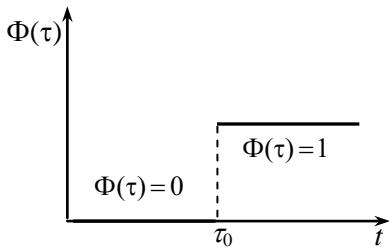


Рис. 6. Ступенчатая функция Хэвисайда

Fig. 6. Step function Heaviside

Важным фактором является фиксация времени отказа оборудования, входящей в тот или иной технологический процесс, поскольку от данного момента времени отсчитывается время перераспределения или время ремонта (в зависимости от выбранной стратегии), в течение которых будет осуществляться простой соответствующей i -го генератора.

Так как система уравнений фиксирует изменение времени T течения технологического процесса (1, 2, 3, 4 или 5), то есть общее время работы ветроэлектростанции (в виде уравнения (1)), то при изменении стратегии природы V_i , соответствующей некоторой i -й единице оборудования, со значениями $V_i = 1$ (работа) на значение $V_i = 0$ (отказ) зафиксировать время отказа возможно с использованием следующих уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_{\text{отк}}^1}{dt} = ((1 - V_1)T - T_{\text{отк}}^1), \\ \frac{dT_{\text{отк}}^2}{dt} = ((1 - V_2)T - T_{\text{отк}}^2), \\ \frac{dT_{\text{отк}}^3}{dt} = ((1 - V_3)T - T_{\text{отк}}^3), \\ \frac{dT_{\text{отк}}^4}{dt} = ((1 - V_4)T - T_{\text{отк}}^4), \\ \frac{dT_{\text{отк}}^5}{dt} = ((1 - V_5)T - T_{\text{отк}}^5). \end{array} \right. \quad (3)$$

Система уравнений (3) позволяет зафиксировать изменение состояния переменной $T_{\text{отк}}^i$ (i – номер технологического процесса). Таким образом, при изменении состояния переменной с нулевого на некоторое отличное от нуля, то это первое отличное от нуля состояние переменной $T_{\text{отк}}^i$ и должно использоваться при исследовании состояний оборудования.

В рассматриваемой задаче структурная схема технологических процессов нижнего уровня, в которые входит какой-либо генератор (G_i) при перераспределении электроэнергии для потребителей Z_i , представлена на рис. 6.

Переменные S_1, S_2, S_3, S_4 и S_5 определяющие загруженность генераторов по производству электроэнергии для первого, второго, третьего, четвертого и пятого потребителей используются в уравнении (4) в соответствии с (2).

На рис. 7 потребители Z_3, Z_4 и Z_5 введены в систему как накопители электроэнергии.

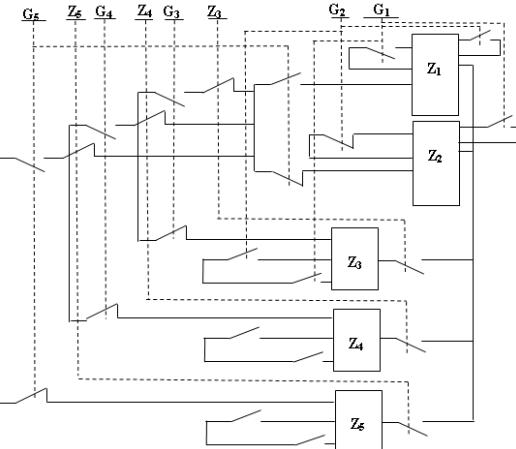


Рис. 7. Структурная схема технологических процессов нижнего уровня

Fig. 7. The block diagram of technological processes of the bottom level

Таким образом, если генератор реализуется в технологическом процессе потребителя Z_1 , то в уравнение (4), описывающее его состояние, должен быть добавлен элемент $1 - (S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 - S_1)$ со значением $S_1 = 1$. Если генератор не входит в реализующийся технологический процесс, то данный элемент автоматически переводит состояние оборудования в «0» ($S_1 = 0$) с последующим перераспределением электроэнергии от потребителей $Z_3 \vee Z_4 \vee Z_5$ к потребителю Z_1 ($S_3 = 0 \vee S_4 = 0 \vee S_5 = 0$).

Генератор, входящий во второй технологический процесс должен содержать в «своем» уравнении состояния элемент $1 - (S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 - S_2)$ со значением $S_2 = 1$, таким образом, автоматически переводит в состояние «0» ($S_2 = 0$), если оборудование не входит во второй технологический процесс и переводит оборудование от потребителей $Z_3 \vee Z_4 \vee Z_5$ к потребителю Z_2 ($S_3 = 0 \vee S_4 = 0 \vee S_5 = 0$).

Так как планирование должно осуществляться на всю продолжительность суток и необходимо контролировать окончание этих суток, то важную роль в эффективности работы ветроэлектростанции играет учет прогноза энергопотребления на один час вперед (контроль каждого часа в течение суток), что сделает возможным упреждение изменения нагрузки в зависимости от продолжительности светового дня и сезонности. В июле потребление электроэнергии может быть меньше в 2 раза по сравнению с декабрям. Таким образом, учет изменения нагрузки должен осуществляться перераспределением технологических процессов № 1 и 2, то есть при повышении нагрузки (холодные месяцы) потребители Z_1 и Z_2 потребляют электроэнергию от генераторов G_1 и G_2 соответственно, а в летний период (при понижении нагрузки) потребление электроэнергии может быть ограничено одним генератором (G_1 или G_2). «Осво-

бодившийся» технологический процесс перераспределяется для накопительной системы (рис. 6). Тогда реализация производства электроэнергии для потребителей Z_1 и Z_2 предполагает следующие состояния:

- если потребители Z_1 и Z_2 питаются электроэнергией от генератора G_1 , то в уравнение (4) должен быть добавлен элемент $S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 (S_1 - S_2)$ со значениями $S_3 = 1 \wedge S_4 = 1 \wedge S_5 = 1 \wedge S_1 = 1 \wedge S_2 = 0$;

- если потребители Z_1 и Z_2 питаются электроэнергией от генератора G_2 , то в уравнение (4) должен быть добавлен элемент $S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 (S_2 - S_1)$ со значениями $S_3 = 1 \wedge S_4 = 1 \wedge S_5 = 1 \wedge S_1 = 0 \wedge S_2 = 1$.

Реализация производства электроэнергии для потребителей Z_3 , Z_4 и Z_5 (накопительная система электроэнергии) предполагает следующие состояния:

- если генератор входит в технологический процесс потребителя Z_3 то в уравнение (4), описывающее его состояние, должен быть добавлен элемент $S_3 \cdot S_1 \cdot S_2$ при условии, что технологические процессы потребителей Z_1 и Z_2 находятся в рабочем состоянии ($S_3 = 1 \wedge S_1 = 1 \wedge S_2 = 1$);

- если генератор входит в технологический процесс потребителя Z_4 , то в уравнение (4), описывающее его состояние, должен быть добавлен элемент $S_4 \cdot S_1 \cdot S_2$ при условии, что технологические процессы потребителей Z_1 и Z_2 находятся в рабочем состоянии ($S_4 = 1 \wedge S_1 = 1 \wedge S_2 = 1$);

- если генератор входит в технологический процесс потребителя Z_5 , то в уравнение (4), описывающее его состояние должен быть добавлен элемент $S_5 \cdot S_1 \cdot S_2$, при условии, что технологические процессы потребителей Z_1 и Z_2 находятся в рабочем состоянии ($S_5 = 1 \wedge S_1 = 1 \wedge S_2 = 1$);

- если генератор не входит в реализующийся третий технологический процесс, то введенный элемент $S_3 \cdot S_1 \cdot S_2$ автоматически переводит состояние оборудования в «0», то есть когда реализуется только первый или второй технологические процессы ($S_3 = 1 \wedge (S_1 = 0 \vee S_2 = 0)$). Таким образом, выполня-

ется перераспределение оборудования от накопительной системы Z_3 к потребителям Z_1 или Z_2 ;

- если генератор не входит в реализующийся четвертый технологический процесс, то введенный элемент $S_4 \cdot S_1 \cdot S_2$ автоматически переводит состояние оборудования в «0», то есть когда реализуется только первый или второй технологические процессы ($S_4 = 1 \wedge (S_1 = 0 \vee S_2 = 0)$). Таким образом, выполняется перераспределение оборудования от накопительной системы Z_3 к потребителям Z_1 или Z_2 ;

- если генератор не входит в реализующийся пятый технологический процесс, то введенный элемент $S_5 \cdot S_1 \cdot S_2$ автоматически переводит состояние оборудования в «0», то есть когда реализуется только первый или второй технологические процессы ($S_5 = 1 \wedge (S_1 = 0 \vee S_2 = 0)$). Таким образом, выполняется перераспределение оборудования от накопительных систем Z_3 , Z_4 , Z_5 к потребителям Z_1 или Z_2 .

Потребление электроэнергии для потребителей Z_1 и Z_2 от накопительных систем Z_3 , Z_4 , Z_5 осуществляется в период простоя технологических процессов № 1 и 2 по причине ремонта либо ожидания (слабый/сильный ветер) ($S_1 = 0 \wedge S_2 = 0$). Тогда в уравнение (4) должен быть добавлен элемент $(1 - S_1) \cdot (1 - S_2)$.

Попытка сформировать обобщенную форму уравнения состояния (4), включая всех потребителей (рис. 6.), потребовала ввести в нее коэффициент S' , характеризующий реализуемый технологический процесс. Коэффициент S' введен в соответствии с ранее описанными рассуждениями:

$$S' = (1 - (S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 - S_1)) \vee (S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 (S_1 - S_2)),$$

$$S' = (1 - (S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 - S_2)) \vee (S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 (S_2 - S_1)),$$

$$S' = (S_3 \cdot S_1 \cdot S_2) \vee (S_4 \cdot S_1 \cdot S_2) \vee (S_5 \cdot S_1 \cdot S_2),$$

$$S' = (1 - S_1) \cdot (1 - S_2).$$

Обозначив, элементы уравнений состояния генераторов через E_i^h , где i – номер технологического процесса; h – номер элемента в уравнении, получим:

$$E_1^1 = 0,5(1 - V_1) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{пер}}^1)) \cdot u_1 (1 - c_1); E_1^2 = -0,5(1 - V_1) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{рем}}^1)) \times \\ \times (1 - u_1) \cdot (1 - c_1); E_1^3 = (1 - V_1) \cdot (\Phi(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{ожид}}^1)) \cdot (1 - u_1) \cdot (1 - c_1); E_1^4 = -0,5(1 - V_1) \times \\ \times (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{рем}}^1)) \cdot c_1,$$

$$E_2^1 = 0,5(1 - V_2) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{пер}}^2)) \cdot u_2 (1 - c_2); E_2^2 = -0,5(1 - V_2) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{рем}}^2)) \times \\ \times (1 - u_2) \cdot (1 - c_2); E_2^3 = (1 - V_2) \cdot (\Phi(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{ожид}}^2)) \cdot (1 - u_2) \cdot (1 - c_2); E_2^4 = -0,5(1 - V_2) \times \\ \times (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{рем}}^2)) \cdot c_2,$$

$$E_3^1 = 0,5(1 - V_3) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{пер}}^3)) \cdot u_3 (1 - c_3); E_3^2 = -0,5(1 - V_3) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{рем}}^3)) \times \\ \times (1 - u_3) \cdot (1 - c_3); E_3^3 = (1 - V_3) \cdot (\Phi(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{ожид}}^3)) \cdot (1 - u_3) \cdot (1 - c_3); E_3^4 = -0,5(1 - V_3) \times \\ \times (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{рем}}^3)) \cdot c_3,$$

$$\begin{aligned}
E_4^1 &= 0,5(1-V_4) \cdot (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^4, t_{\text{неп}}^4)) \cdot u_4(1-c_4); E_4^2 = -0,5(1-V_4) \cdot (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^4, t_{\text{рем}}^4)) \times \\
&\times (1-u_4) \cdot (1-c_4); E_4^3 = (1-V_4) \cdot (\Phi(T-T_{\text{отк}}^4, t_{\text{ожид}}^4)) \cdot (1-u_4) \cdot (1-c_4) \cdot c_4; E_4^4 = -0,5(1-V_4) \times \\
&\times (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^4, t_{\text{рем}}^4)) \cdot c_4, \\
E_5^1 &= 0,5(1-V_5) \cdot (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^5, t_{\text{неп}}^5)) \cdot u_5(1-c_5); E_5^2 = -0,5(1-V_5) \cdot (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^5, t_{\text{рем}}^5)) \times \\
&\times (1-u_5) \cdot (1-c_5); E_5^3 = (1-V_5) \cdot (\Phi(T-T_{\text{отк}}^5, t_{\text{ожид}}^5)) \cdot (1-u_5) \cdot (1-c_5) \cdot c_5; E_5^4 = -0,5(1-V_5) \times \\
&\times (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^5, t_{\text{рем}}^5)) \cdot c_5, \\
E_6^1 &= 0,5(1-V_6) \cdot (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^6, t_{\text{неп}}^6)) \cdot u_6(1-c_6); E_6^2 = -0,5(1-V_6) \cdot (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^6, t_{\text{рем}}^6)) \times \\
&\times (1-u_6) \cdot (1-c_6); E_6^3 = (1-V_6) \cdot (\Phi(T-T_{\text{отк}}^6, t_{\text{ожид}}^6)) \cdot (1-u_6) \cdot (1-c_6) \cdot c_6; E_6^4 = -0,5(1-V_6) \times \\
&\times (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^6, t_{\text{рем}}^6)) \cdot c_6.
\end{aligned}$$

Таким образом, форма уравнений состояния оборудования (генератор, накопительная система электроэнергии) при перераспределении на первый, второй, третий, четвертый, пятый или шестой технологические процессы имеет вид:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= \left[\begin{array}{l} ((1-(S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 - S_1)) \vee (S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 (S_1 - S_2))) \cdot \\ \left\{ V_1 \left(V_1 + (0,5E_1^1 - 0,5E_1^2 + E_1^3 - 0,5E_1^4) \right) \right\} - X_1 \end{array} \right] \\
\frac{dx_2}{dt} &= \left[\begin{array}{l} ((1-(S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 - S_2)) \vee (S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 (S_2 - S_1))) \cdot \\ \left\{ V_2 \left(V_2 + (0,5E_2^1 - 0,5E_2^2 + E_2^3 - 0,5E_2^4) \right) \right\} - X_2 \end{array} \right] \\
\frac{dx_3}{dt} &= \left[\begin{array}{l} (S_3 \cdot S_1 \cdot S_2) \cdot \left\{ V_3 \left(V_3 + (0,5E_3^1 - 0,5E_3^2 + E_3^3 - 0,5E_3^4) \right) \right\} - X_3 \\ \vee \\ (S_4 \cdot S_1 \cdot S_2) \cdot \left\{ V_4 \left(V_4 + (0,5E_4^1 - 0,5E_4^2 + E_4^3 - 0,5E_4^4) \right) \right\} - X_3 \\ \vee \\ (S_5 \cdot S_1 \cdot S_2) \cdot \left\{ V_5 \left(V_5 + (0,5E_5^1 - 0,5E_5^2 + E_5^3 - 0,5E_5^4) \right) \right\} - X_3 \end{array} \right] \\
\frac{dx_4}{dt} &= \left[\begin{array}{l} (1-S_1) \cdot (1-S_2) \left\{ V_6 \left(V_6 + (0,5E_6^1 - 0,5E_6^2 + E_6^3 - 0,5E_6^4) \right) \right\} - X_4 \end{array} \right]
\end{aligned}$$

Уравнение состояния оборудования при перераспределении на первый, второй, третий, четвертый, пятый или шестой технологические процессы в общей форме:

В уравнении (4) составляющий элемент $1-V_i$ при равенстве 1 стратегии V_i определяет работоспособность оборудования, входящего в i -й технологический процесс.

Уравнение (4) позволяет зафиксировать номер реализуемого технологического процесса, в котором генератор может находиться в одном из четырех состояний: перераспределение, ремонт, простой по причине слабый/сильный ветер (при соответствующей стратегии u_i).

Логическое толкование сформированного уравнения (4):

1) генератор G_3 , G_4 или G_5 (или накопительная система электроэнергии Z_3 , Z_4 или Z_5) находится в состоянии перераспределения на производство электроэнергии другому потребителю (состояние $x_i = 0,5$ характеризует состояние оборудования – перераспределение);

2) генератор (G_1 и/или G_2) находится в состоянии простоя по причине «собственного» ремонта (принята соответствующая стратегия ремонта u_i), перераспределение оборудования возможно $1-c_i$;

3) генераторы G_1 и G_2 находятся в состоянии простоя по причине ожидания рабочей скорости ветра (принята соответствующая стратегия слабый/сильный ветер u_i), перераспределение оборудования возможно $1-c_i$;

4) генераторы G_3 и/или G_4 и/или G_5 находятся в состоянии простоя по причине «собственного» ремонта (принята соответствующая стратегия ремонта u_i), перераспределение оборудования невозможно c_i , обусловленное отсутствием негативного влияния на производство электроэнергии потребителям Z_1 и Z_2 .

$$\frac{dx_i}{dt} = \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} V_i + 0,5(1-V_i) \cdot (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^i, t_{\text{неп}}^i)) \cdot u_i(1-c_i) - 0,5(1-V_i) \cdot \\ \left\{ V_i \left(V_i + (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^i, t_{\text{рем}}^i)) \cdot (1-u_i) \cdot (1-c_i) + (1-V_i) \cdot \Phi(T-T_{\text{отк}}^i, t_{\text{ожид}}^i) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. (1-u_i) \cdot (1-c_i) - 0,5(1-V_i) \cdot (1-\Phi(T-T_{\text{отк}}^i, t_{\text{рем}}^i)) \cdot c_i \right) \right\} - X_i \end{array} \right] \end{array} \right] \quad (4)$$

Ступенчатая функция Хэвисайда в (4) интерпретируется следующим образом:

$$\begin{cases} \Phi(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{пер}}^i) \\ \Phi(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{рем}}^i) \\ \Phi(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{ожид}}^i) \end{cases} = \begin{cases} 0 \text{ при } \begin{cases} T - T_{\text{отк}}^i \leq t_{\text{пер}}^i \\ T - T_{\text{отк}}^i \leq t_{\text{рем}}^i \\ T - T_{\text{отк}}^i \leq t_{\text{ожид}}^i \end{cases} \\ 1 \text{ при } \begin{cases} T - T_{\text{отк}}^i > t_{\text{пер}}^i \\ T - T_{\text{отк}}^i > t_{\text{рем}}^i \\ T - T_{\text{отк}}^i > t_{\text{ожид}}^i \end{cases} \end{cases}$$

Анализ полученных результатов и выводы

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- предложен двухуровневый (иерархический) подход решения задачи математического моделирования учета состояния процесса многомашинной ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах;
- произведено описание стратегий принятия решений: природы, планировщика, состояния фазовой координаты генераторов, подключенных к ветроэнергоустановке;
- на основе принятых стратегий и использовании ступенчатой функции Хэвисайда $\Phi(\tau)$ для фиксации времени течения технологического процесса выполнено описание уравнения состояния генераторов, подключенных к ветроэнергоустановке.

Полученные результаты исследований могут использоваться для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы.

Библиографические ссылки

1. Серебряков Р. А. Перспективы развития ветроэнергетики // Точная наука. 2021. № 110. С. 2–13.
- 2 Серебряков Р. А. Теоретические основы математического моделирования вихревой ветроэнергетической установки // Точная наука. 2021. № 110. С. 23–30.
- 3 Многоагрегатная ветроэнергетическая установка для районов с низким ветровым потенциалом / С. С. Доржиев, Е. Г. Базарова, В. В. Пилипов, М. И. Розенблум // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 2 (31). С. 45–52.
4. Qin Hongwu, Li Xinze, Chye En Un, Voronin V. V. Research on the mechanism of wind turbine blades ice coating and anti-icing methods // Вестник ТОГУ. 2021. № 2 (61). С. 53–60.
5. Wei K, Yang Y, Zuo H, et al. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. Wind Energy. 2020. No. 23(3). Pp. 433–457.
6. Пионкевич В. А. Следящие системы автоматического управления напряжением асинхронного генератора и перспективы их развития // Вестник ИрГТУ. 2016. № 2 (109). С. 81–86.
7. Нечаев И. С., Шонина Д. Е. Особенности и проблемы развития ветровой энергетики // Молодой ученый. 2019. № 15 (253). С. 44–46.
8. Горячев С. В., Смолякова А. А. Проблемы и перспективы ветроэнергетических систем в России // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 5 (119). С. 37–41.

9. Александров О. И., Демьянкова В. С., Пекарчик О. А. Оптимизация межсистемных перетоков во взаимодействующих энергообъединениях // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 21–22 декабря 2021 г. Минск : БГАТУ, 2021. С. 27–28.

10. Третьяков Е.А. Совершенствование методов управления передачей и распределением электроэнергии в адаптивных системах электроснабжениях стационарных потребителей железных дорог : дис. ... докт. техн. наук. Омск, 2022. 403 с.

11. Назаров М. Х. Оптимизация и планирование режимов автономной энергетической системы на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии (на примере системы Памира) : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2022. 195 с.

12. Шклярский Я. Э., Батуева Д. Е. Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветродизельной электростанцией. Записки горного института. 2022. Т. 253. С. 115–126. DOI: 10.31897/PMI.2022.7.

13. Олейников А. М., Канов Л. Н. Исследование режимов работы многомашинной ветроустановки с механической редукцией // Альтернативная энергетика и экология : Международный научный журнал (ISJAE), 2019; 10-12:12-22.

14. Буяльский В. И. Методы повышения эффективности ветроэлектростанции на основе математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям в Арктике и на Крайнем Севере. // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 2. С. 32–40. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-32-40.

15. Буяльский В. И. Эффективность многомашинных ветроагрегатов в Арктике и на Крайнем Севере // Интеллектуальные системы в производстве. – 2025. Т. 23, № 3. С. 63–70. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-63-70.

References

1. Serebryakov R.A. *Tochnaya nauka*. The exact science, 2021, no. 110, pp. 2-13 (in Russ.).
2. Serebryakov R.A. *Tochnaya nauka*. The exact science. 2021, no. 110, pp. 23-30 (in Russ.).
3. Dorgiev S.S., Bazarova E.G., Pilipkov V.V., Rozenblum M.I. [Multi-unit wind turbine for areas with low wind potential]. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2021. No. 2, pp. 45-52 (in Russ.).
4. Qin Hongwu, Li Xinze, Chye En Un, Voronin V.V. [Research on the mechanism of wind turbine blades ice coating and anti-icing methods]. *Vestnik TOGU*. 2021. No. 2. Pp. 53-60.
5. Wei K, Yang Y, Zuo H, et al. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. *Wind Energy*. 2020. No. 23(3). Pp. 433–457.
6. Pionkovich V.A. [Watching systems of automatic control of pressure of the asynchronous generator and prospect of their development]. *Bulletin IrGTU*. 2016. vol. 109, no. 2, pp. 81-86 (in Russ.).
7. Nechey I.S., Shonina D.E. Features and problems of development of wind power // *Molodoy ucheniy*. 2019. No. 15. Pp. 44-46 (in Russ.).
8. Goryachev S.V., Smolyakova A.A. [Problems and prospects wind power systems in Russia]. *Megdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy журнал*. 2022. No. 59). Pp. 37–41 (in Russ.).
9. Aleksandrov O.I., Demjankova V.S., Pekarchik O.A. *Optimizaciya mejsistemnih peretokov vo vzaimodeystvuyushchih energoobyedineniyah* [Optimization of intersystem overflows

in co-operating power associations]. *Energosberejenie – vayneyshee uslovie inovacionogo razvitiya APK: materiali Međunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Power savings – the major condition of innovative development of agrarian and industrial complex: materials of the International scientific and technical conference], Minsk, 21-22 december, 2021, pp. 27-28 (in Russ.).

10. Tretjakov E.A. *Sovershenstvovanie metodov upravleniya peredachey i raspredeleniem elektroenergii v adaptivnih sistemah elektrosnabjeniya stacionarnih potrebiteley jeleznih dorog* [Perfection of control methods by transfer and electric power distribution in adaptive systems electric supply stationary consumers of railways]: PhD thesis. Omsk, 2022. 403 p. (in Russ.).

11. Nazarov M.H. *Optimizaciya i planirovanie rejimov avtonomnoy energeticheskoy sistemi na osnove vozobnovlyaemih i alyternativnih istochnikov energii (na primere sistemi Pamira)* [Optimization and planning of modes of an independent power system on the basis of renewed and alternative energy sources (on an example of system of Pamir)]: PhD thesis. Novosibirsk, 2022. 195 p. (in Russ.).

12. Shkljarskij J.E., Batueva D.E. *Razrabotka algoritma vibora rejimov raboti kompleksa elektrosnabjeniya s vetrodizelynoy elektrostanciey* [Working out of algorithm of a choice of operating modes of a complex of electrosupply with wind diesel power plant]. *Zapiski gornogo instituta*. 2022, vol. 253, pp. 115-126 (in Russ.). DOI:10.31897/PMI.2022.7.

13. Olejnikov A.M., Kanov L.N. [Research of operating modes multimachine wind turbine with a mechanical reduction]. *Međunarodni nauchni journal "Alternativnaya energetika i ekologiya"*. 2019, no. 10-12, pp. 12-22 (in Russ.). DOI:10.15518/ISJAE.2019.10-12.12-22.

14. Buyalsky V.I. [Methods of increase of efficiency wind power station on the basis of mathematical modeling of the account of the condition process wind turbine at distribution of the electric power to consumers in Arctic regions and on the Far North]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 32-40 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2024-2-32-40.

15. Буяльский В.И. [Efficiency multimachine wind power station in Arctic regions and on the Far North] *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 63-70 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2025-3-63-70.

* * *

Mathematical Modeling of a Multimachine Wind Power Unit Condition at Electric Power Distribution to Consumers

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, State Autonomous Educational Institution of Vocational Training “Institute for Education Development” Sevastopol, Russia

The relevance of wind power plant efficient control method, based on mathematical modeling of a multimachine wind power turbine process condition for electric power distribution to the consumers so as to minimize decision-making time of electric power production redistribution due to equipment failure data (generator, power storage system), that promotes optimum planning of consumer power supply, is validated.

The offered two-level (hierarchical) approach allows to differentiate solutions of a mathematical modeling problem of the account of multimachine wind power unit process condition at the bottom level (level of generator arrangement addition sub connected to wind turbine) and the top level (wind turbine arrangement level, as a whole system) at electric power distribution to consumers in northern regions.

In the result of effective wind power unit control analysis based on mathematical modeling of generator process condition sub connected to the wind power unit, it is reasonable to apply methods of game theory and mathematical methods of difference equation analysis of pulse system.

Decision-making strategies at the bottom level of the technological process, caused by "nature" (generator working capacity or failure), scheduler (generator repair or redistribution) and phase co-ordinate condition (generator repair, downtime, redistribution or operation) are defined.

Generator condition equation sub connected to wind power unit, giving access to equipment failure due to downtime, redistribution or repair data, optimizing planning of the electric power supply is described on the basis of the accepted strategies and the Heaviside step function $\Phi(\tau)$ to fix the technological process time.

Keywords: mathematical modeling, wind turbine, electric power distribution, a technological process, consumer, decision-making, process condition.

Получено: 18.03.25

Образец цитирования

Буяльский В. И. Математическое моделирование учета состояния процесса многомашинной ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 4. С. 47–54. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-47-54.

For Citation

Buyalsky V.I. [Mathematical modeling of a multimachine wind power unit condition at electric power distribution to consumers]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 47-54 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-47-54.