

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-32-40

Методы повышения эффективности ветроэлектростанции на основе математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям в Арктике и на Крайнем Севере

В. И. Буяльский, кандидат технических наук, государственное бюджетное образовательное учреждение «Средняя общеобразовательная школа № 23», Севастополь, Россия

Обоснована актуальность способа эффективного управления ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины 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 (ветротурбина, накопительная система электрической энергии), что способствует оптимальному планированию обеспечения требуемого объема электричества объекту потребления в северных широтах.

Сделан обзор основных способов математического моделирования перераспределения электроэнергии потребителям, который показал, что существуют определенные постановки задач, для которых недостаточно широко описаны математические модели или нет готовых и эффективных методов их решения, в частности математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах.

В результате проведенного анализа способа эффективного управления ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины 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, обусловленные «природой» (работоспособность или отказ ветротурбины), планировщиком (ремонт или перераспределение ветротурбины) и состоянием фазовой координаты (ремонт, простой, перераспределение или работа ветротурбины).

На основе принятых стратегий и использовании ступенчатой функции Хевисайда $\Phi(\tau)$ для фиксации времени течения технологического процесса выполнено описание уравнения состояния ветротурбины, 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. Отсутствие централизованного электроснабжения и традиционное обеспечение электроэнергией от устаревших дизельных электрогенераторов и небольших угольных станций в самых северных районах России делает критически важной 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.

В то же время задача распределения электроэнергии потребителям является сложной актуальной вычислительной задачей и крайне востребованной с практической точки зрения. Вместе с тем существуют определенные постановки задач, для которых недостаточно широко описаны математические модели или нет готовых и эффективных методов их решения, в частности математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах [1–14].

Целью выполненных исследований является описание математической модели учета состояния процесса оборудования (простой, ремонт,

перераспределение, работа), что способствует улучшению эффективности управления ветроэлектростанцией при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах.

Стратегии принятия решений

Эффективное управление ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса ветроэнергостановки при распределении электроэнергии потребителям, обусловленное наличием динамических режимов в дискретные моменты времени и стратегий выбора оптимального решения по управлению может быть достигнуто применением следующих подходов:

– Теория игр, когда неопределенность выбора решения связана с неизвестным поведением «природы», не содержащей элементов сознательного противодействия разработанным планам [15].

– Математические методы анализа функционирования импульсных систем на основе разностных уравнений [16].

Таким образом, для математического моделирования учета состояния процесса ветроэнергостановки при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах с целью оптимального планирования обеспечения требуемого объема потребляемой электрической энергии определены стратегии и математические методы анализа функционирования импульсных систем на основе разностных уравнений, связанные с поиском оптимальных управляющих воздействий.

1. Стратегия природы: $V = \{0,1\}$, где 1 – работоспособная ветротурбина, 0 – отказ какой-либо ветротурбины.

Вид функции $v = (\cdot) : (v(t_*[\cdot]9))$ представлен на рис. 1.



Рис. 1. Вид функции стратегии природы

Fig. 1. Kind of function of strategy of the nature

2. Стратегия планировщика: $U = \{0,1\}$, где 0 – ремонт ветротурбины (отказавшей одной из ветротурбин); 1 – перераспределение ветротурбины на другого (одного из трех) потребителя.

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

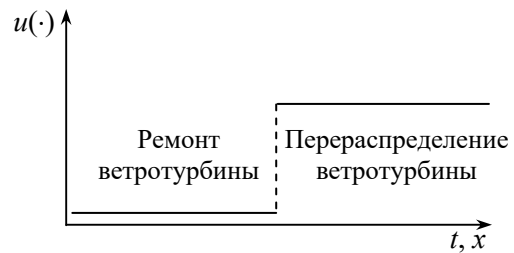


Рис. 2. Вид функции стратегии планировщика

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

3. Стратегия состояния процесса: X_i – фазовая координата, характеризующая состояние i -й ветротурбины.

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

Простой возможен по причине связанной с ветром (слабый или сильный ветер) [17].

Несомненно, состояния ремонта, перераспределения и простоя могут быть сведены в одно состояние – простой. Но тогда будет невозможно определить состояние системы – ремонт, перераспределение, – в любой момент времени.

Перераспределение ветротурбины 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, что характеризует наличие трех технологических процессов (рис. 3).

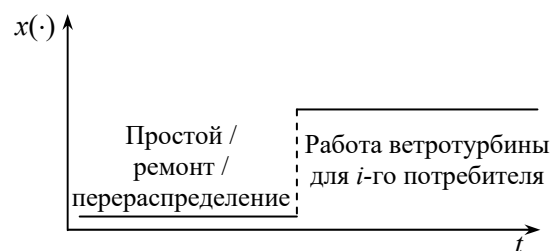


Рис. 3. Работа ветротурбины для первого, второго либо третьего потребителя

Fig. 3. Work wind turbine for the first, second or third consumer

4. Начальные условия. Так как расчет решения (поиск оптимальных управляющих воздействий) должен осуществляться при начальных перераспределениях ветротурбины на производ-

ство электроэнергии для первого, второго и третьего потребителя, то реализация такого расчета основывается на одном варианте начальной загрузки. Таким образом, вид начального условия: $\{t_*, x_*^1 \wedge x_*^2 \wedge x_*^3\}$, где $t_* = t_0$, $x_*^1 \wedge x_*^2 \wedge x_*^3$ – установка ветротурбины на производство электроэнергии для первого, второго и третьего потребителей.

5. Так как планирование производства требуемого объема электроэнергии должно осуществляться на всю продолжительность суток, то необходимо контролировать окончание этих суток (планирование от $t_* = 0$ до $\vartheta = T_{сут}$), где $T_{сут}$ – 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 первого, второго и третьего потребителей может быть не произведено и за это предусмотрен штраф, следовательно, необходимо контролировать необходимый объем электроэнергии для потребителей № 1, 2 и 3.

7. Необходимо отметить, что потребитель № 3 введен в систему как накопитель электроэнергии, так как позволяет обеспечить оптимальную работу ветроэлектростанции в период простоя ветрогенераторов по причине слабого или сильного ветра либо на период планового или аварийного ремонта, расходуя запасенную энергию [18, 19].

Таким образом, оборудование потребителя № 3 должно перераспределяться в технологические процессы № 1 и 2 по причине ремонта их оборудования 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 технологического процесса № 3. Так как в рассматриваемой задаче исследуется производство электроэнергии для трех потребителей, то введение индексов S_1 , S_2 и S_3 позволяет решить данную задачу.

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

$$\begin{aligned}
 S_3, S_2, (S_1) &= \begin{cases} 1,1,1, \text{оборудование входит} \\ \text{в 1-й технологический процесс;} \\ 0,1,0, \text{перераспределение оборудования} \\ \text{из 3-го в 1-й технологический} \\ \text{процесс;} \\ 1,1,0, \text{перераспределение оборудования} \\ \text{из 1-го во 2-й технологический} \\ \text{процесс;} \end{cases} \\
 S_3, (S_2), S_1 &= \begin{cases} 1,1,1, \text{оборудование входит} \\ \text{во 2-й технологический процесс;} \\ 0,0,1, \text{перераспределение оборудования} \\ \text{из 3-го во 2-й технологический процесс;} \\ 1,0,1, \text{перераспределение оборудования} \\ \text{из 2-го в 1-й технологический процесс;} \end{cases} \\
 (S_3), S_2, S_1 &= \begin{cases} 1,1,1, \text{оборудование входит} \\ \text{в 3-й технологический процесс;} \\ 1,0,0, \text{оборудование входит} \\ \text{в 3-й технологический процес.} \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Уравнение состояния ветроэнергостановки

1) Стратегии природы для i -й ветротурбины:

$V_i = 1$ – ветротурбина в рабочем режиме;

$V_i = 0$ – отказ ветротурбины.

2) Стратегии планировщика загрузки ветротурбины:

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

$u_i = 0$ – ремонт ветротурбины 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 -я ветротурбина находится в состоянии ремонта;

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

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

$x_i = 1$ – состояние работы оборудования.

Таким образом, в графической интерпретации состояния фазовой координаты представлены на рис. 4.

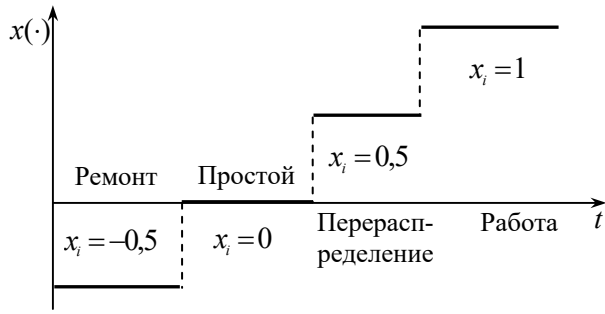


Рис. 4. Состояния фазовой координаты

Fig. 4. Conditions of phase coordinate

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

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

Графическая интерпретация ступенчатой функции Хевисайда $\Phi(\tau)$ представлена на рис. 5.

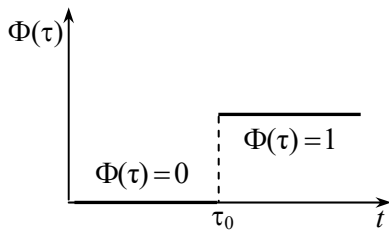


Рис. 5. Ступенчатая функция Хевисайда

Fig. 5. Step function Heaviside

Важным фактором является фиксация времени отказа оборудования, входящего 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 -й ветротурбины.

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

$$\begin{cases} \frac{dT_{\text{отк}}^1}{dt} = ((1-V_1)T - T_{\text{отк}}^1), \\ \frac{dT_{\text{отк}}^2}{dt} = ((1-V_2)T - T_{\text{отк}}^2), \\ \frac{dT_{\text{отк}}^3}{dt} = ((1-V_3)T - T_{\text{отк}}^3). \end{cases} \quad (3)$$

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 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, в которые входит какая либо ветротурбина (G_i) при перераспределении электроэнергии для потребителей Z_i , представлена на рис. 6.

Переменные S_1, S_2 и S_3 , определяющие загруженность энергоагрегатов по производству электроэнергии для первого, второго и третьего потребителей, используются в уравнении состояния (4) в соответствии с (2).

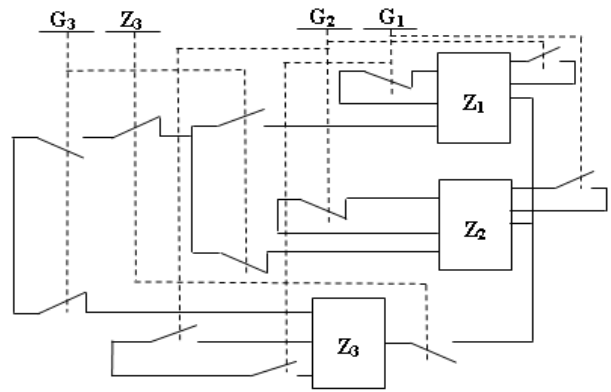


Рис. 6. Структурная схема технологических процессов

Fig. 6. The blok diagram of technological processes

На рис. 6 потребитель Z_3 введен в систему как накопитель электроэнергии, определенный выше.

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

Ветротурбина, входящая во второй технологический процесс, должна содержать в «своем» уравнении состояния элемент $(1-S_3-S_2) \vee S_2$ 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 потребителя Z_3 к потребителю Z_2 ($S_3=1$).

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 декабрем. 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 ветрогенераторов G_1 и G_2 соответственно, а в летний период (при понижении нагрузки) потребление электроэнергии может быть ограничено одним энергоагрегатом (G_1 или G_2).

«Освободившийся» 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 ветротурбины G_1 , то в уравнение (4) должен быть добавлен элемент $S_3(S_1-S_2)$ со значениями $S_3=1 \wedge S_1=1 \wedge S_2=0$;

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

Реализация производства электроэнергии для потребителя Z_3 (накопительная система электроэнергии) предполагает следующие состояния:

– если ветротурбина 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 ветротурбина 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, выполняется перераспределение оборудования от накопительной системы Z_3 к потребителям Z_1 или Z_2 .

Потребление электроэнергии для потребителей Z_1 и Z_2 от накопительной системы Z_3 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:

$$\begin{aligned} S' &= ((1-S_3-S_1) \vee S_1) \vee (S_3(S_1-S_2)), \\ S' &= ((1-S_3-S_2) \vee S_1) \vee (S_3(S_2-S_1)), \\ S' &= S_3 \cdot S_1 \cdot S_2, \quad S' = (1-S_1) \cdot (1-S_2). \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} E_2^1 &= 0,5(1-V_2) \cdot (1-\Phi(T-T_{отк}^2, t_{пер}^2)) \cdot u_2(1-c_2); \\ E_2^2 &= -0,5(1-V_2) \cdot (1-\Phi(T-T_{отк}^2, t_{рем}^2)) \times \\ &\quad \times (1-u_2) \cdot (1-c_2); \\ E_2^3 &= (1-V_2) \cdot (\Phi(T-T_{отк}^2, t_{ожид}^2)) \cdot (1-u_2) \cdot (1-c_2); \\ E_2^4 &= -0,5(1-V_2) \times (1-\Phi(T-T_{отк}^2, t_{рем}^2)) \cdot c_2 \\ E_3^1 &= 0,5(1-V_3) \cdot (1-\Phi(T-T_{отк}^3, t_{пер}^3)) \cdot u_3(1-c_3); \\ E_3^2 &= -0,5(1-V_3) \cdot (1-\Phi(T-T_{отк}^3, t_{рем}^3)) \times \\ &\quad \times (1-u_3) \cdot (1-c_3); \\ E_3^3 &= (1-V_3) \cdot (\Phi(T-T_{отк}^3, t_{ожид}^3)) \cdot (1-u_3) \cdot (1-c_3); \\ E_3^4 &= -0,5(1-V_3) \cdot (1-\Phi(T-T_{отк}^3, t_{рем}^3)) \cdot c_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_4^1 &= 0,5(1-V_4) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{пер}}^4)) \cdot u_4 (1 - c_4); \\
E_4^2 &= -0,5(1-V_4) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{рем}}^4)) \times \\
&\quad \times (1 - u_4) \cdot (1 - c_4); \\
E_4^3 &= (1 - V_4) \cdot (\Phi(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{ожид}}^4)) \cdot (1 - u_4) \cdot (1 - c_4) \cdot c_4; \\
E_4^4 &= -0,5(1 - V_4) \times (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{рем}}^4)) \cdot c_4.
\end{aligned}$$

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

$$\begin{cases}
\frac{dx_1}{dt} = \left[((1 - S_3 - S_1) \vee S_1) \vee (S_3(S_1 - S_2)) \{V_1(V_1 + (0,5E_1^1 - 0,5E_1^2 + E_1^3 - 0,5E_1^4))\} - X_1 \right]; \\
\frac{dx_2}{dt} = \left[((1 - S_3 - S_2) \vee S_2) \vee (S_3(S_2 - S_1)) \{V_2(V_2 + (0,5E_2^1 - 0,5E_2^2 + E_2^3 - 0,5E_2^4))\} - X_2 \right]; \\
\frac{dx_3}{dt} = \left[S_3 \cdot S_1 \cdot S_2 \{V_3(V_3 + (0,5E_3^1 - 0,5E_3^2 + E_3^3 - 0,5E_3^4))\} - X_3 \right]; \\
\frac{dx_4}{dt} = \left[(1 - S_1) \cdot (1 - S_2) \{V_4(V_4 + (0,5E_4^1 - 0,5E_4^2 + E_4^3 - 0,5E_4^4))\} - X_4 \right].
\end{cases}$$

Уравнение состояния оборудования при перераспределении на первый, второй, третий или

четвертый технологические процессы в общей форме:

$$\frac{dx_i}{dt} = \left[S' \left\{ V_i \left[\begin{aligned} &V_i + 0,5(1 - V_i) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{пер}}^i)) \cdot u_i (1 - c_i) - 0,5(1 - V_i) \times \\ &\times (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{рем}}^i)) \cdot (1 - u_i) \cdot (1 - c_i) + (1 - V_i) \cdot \Phi(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{ожид}}^i) \times \\ &\times (1 - u_i) \cdot (1 - c_i) - 0,5(1 - V_i) \cdot (1 - \Phi(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{рем}}^i)) \cdot c_i \end{aligned} \right] \right\} - X_i \right]$$

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 энергоагрегат 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) ветротурбина G_3 (или накопительная система электроэнергии Z_3) находится в состоянии перераспределения на производство электроэнергии другому потребителю (состояние $x_i = 0,5$ характеризует состояние оборудования – перераспределение);

2) ветротурбина (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) ветротурбины 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) ветротурбина G_3 находится 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 .

Ступенчатая функция Хевисайда 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:

– обоснована актуальность метода эффективного управления ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах;

– сделан обзор основных способов математического моделирования перераспределения электроэнергии потребителям;

– для рационального принятия решений, оптимального планирования обеспечения требуемого объема потребляемой мощности опреде-

лено, что одним из целесообразных подходов является применение теории игр;

– произведено описание стратегий принятия решений: природы, планировщика, состояния фазовой координаты ветротурбины;

– на основе принятых стратегий и использовании ступенчатой функции Хевисайда $\Phi(\tau)$ для фиксации времени течения технологического процесса выполнено описание уравнения состояния ветротурбины.

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

Библиографические ссылки

1. Голумзода А. Х. Новые технологии управления синхронизацией и восстановлением нормального режима электрических сетей с распределенной малой генерацией : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2022. 186 с.

2. Фишов А. Г., Гуломзода А. Х., Касобов Л. С. Децентрализованная реконфигурация электрической сети с microgrid с использованием реклоузеров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24, № 2 (151). С. 382–395.

3. Воденников Д. А. Взаимодействие электропитающей организации и активного потребителя при управлении электропотреблением // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 8. С. 77–83.

4. Архипова О. В., Ковалев В. З., Хамитов Р. Н. Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 1. С. 173–180.

5. Паздерин А. А. Разработка модели энергостойкого распределения и ее применение в электрических сетях : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 189 с.

6. Богомолов Р. А. Создание CIM-модели в АО «СО ЕЭС» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 2 (65). С. 26–31.

7. Воротницкий В. Э. Уроки истории техники и технологий передачи электроэнергии во второй половине XIX века // Энергоэксперт. 2023. № 1. С. 14–23.

8. Балилова А. И. Прогнозирование потребления электрической энергии электротехническим комплексом городской электрической сети : дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2019. 166 с.

9. Воротницкий В. Э. Тенденции и перспективы развития техники и технологий передачи и распределения электроэнергии // Энергоэксперт. 2023. № 2. С. 28–33.

10. Иванов А. В., Чайкин В. С., Соснина Е. Н. Архитектурная модель интеллектуальной энергетической системы как инструмент системной инженерии // Энергия единой сети. 2022. № 5–6 (66–67). С. 14–24.

11. Наумов В. А., Матисон В. А., Федеров Ю. Г. Новые направления развития стандартизации в процессе цифровой трансформации электроэнергетики // Энергия единой сети. 2022. № 3–4 (64–65). С. 19–29.

12. Воротницкий В. Э. О системном подходе к повышению энергетической и экономической эффективности электрических сетей нового технологического уклада // Энергетик. 2020. № 4. С. 14–19.

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

14. Третьяков Е. А. Совершенствование методов управления передачей и распределением электроэнергии в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог : дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2022. 403 с.

15. Гермейер Ю. Б. Игры с противоположными интересами. М. : Наука, 1976. 327 с.

16. Ягодкина Т. В., Беседин В. М. Теория автоматического управления: учебник и практикум для вузов. Москва ; Берлин : Юрайт, 2024. 470 с.

17. Буяльский В. И. Программное обеспечение управления ветротурбиной в составе ветроэлектростанции на базе учёта вибрационной нагруженности привода и своевременной подготовки процесса принятия управляющих решений при разных режимах эксплуатации энергоагрегата // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 79–87. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-79-87.

18. 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.

19. 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.

References

1. Golumzoda A.H. *Novie tehnologii upravleniya sinhronizatsiey i vosstanovleniem normalnogo rejima elektricheskikh setey s raspredelennoy maloy generatsiey* [New technologies of control of synchronization and restoration of a normal mode of electric networks with the distributed small generation]: PhD thesis. Novosibirsk, 2022. 186 p. (in Russ.).

2. Fischov A.G. [Decentralised reconfiguration an electric network with microgrid with use reclosers]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2020. vol. 21, no. 2, pp. 382-395 (in Russ.).

3. Vodennikov D.A. [Interaction of the electrosupplying organisation and the active consumer at control of a power consumption]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsia i remont*. 2019. No 8, pp. 77-83 (in Russ.).

4. Arhipova O.V. [Metodika of modelling regional the isolated electrotechnical complex]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Injiring georesurosov*. 2019. vol. 330, pp. 173-180 (in Russ.).
5. Pazderin A.A. *Razrabotka modeli energo-stoimostnogo raspredeleniya i ee primenenie v elektricheskikh setyakh* [Working out of model of energo-cost distribution and its application in electric networks]: PhD thesis. Ekaterinburg, 2019. 189 p. (in Russ.).
6. Bogomolov R.A. [CIM-model creation in AO «SO EES»]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2021. vol. 65, no. 2, pp. 26-31 (in Russ.).
7. Vorotnitsky V.E. [Lessons of history of techniques and technologies of transfer of the electric power in second half XIX centuries]. *Energoekspert*. 2023. No 1, pp. 14-23 (in Russ.).
8. Balilova A.I. *Prognozirovanie potrebleniya elektricheskoy energii elektrotehnicheskim kompleksom gorodskoy elektricheskoy seti* [Forecasting of consumption of electric energy by an electrotechnical complex of a city electric network]: PhD thesis. Ulyanovsk, 2019. 166 p. (in Russ.).
9. Vorotnitsky V.E. [Tendency and prospects of development of techniques and technologies of transfer and electric power distribution]. *Energoekspert*. 2023. No. 2, pp. 28-33 (in Russ.).
10. Ivanov A.V., Tchaikin V. S, Sosnina E.N. [Architectural model of an intellectual power system as the tool of system engineering]. *Energiya edinoy seti*. 2022. vol. 66–67, no 5–6, pp. 14–24 (in Russ.).
11. Naumov V. A, Matison V. A, Федеров U.G. [New of a direction of development of standardization in the course of digital transformation of electric power industry]. *Energiya edinoy seti*. 2022. vol. 5-6, no. 3-4, pp. 19-29 (in Russ.).
12. Vorotnitsky V.E. [About the system approach to increase power and economic efficiency of electric networks of new technological way]. *Energetik*. 2020. No 4, pp. 14-19 (in Russ.).
13. Aleksandrov O.I., Demjankova V.S., Pekarchik O.A.. *Optimizaciya mejsistemnih peretokov vo vzaimodeystviyuschiy energoobyedineniyah* [Optimization of intersystem overflows in co-operating power associations]. *Energoberejenie – vajneyshee uslovie inovacionogo razvitiya APK: materialy Mejdunarodnoy 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.).
14. Tretjakov E.A. *Sovershenstvovanie metodov upravleniya peredachey i raspredeleniem elektroenergii v adaptivnykh sistemah elektrosnabzheniya stacionarnykh potrebiteley jeleznykh 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.).
15. Germejer J.B. *Igri s neprotivopolozhnimi interesami* [Games with not opposite interests]. M.: Nauka, 1976. 327 p. (in Russ.).
16. Yagotkina T.V. *Toriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik I praktikum dlya vuzov* [Theory of automatic control: the textbook and a practical work for high schools]. Moskva ; Berlin : Yurayt Publ. 2024. 470 p. (in Russ.).
17. Buyalsky V.I. [Software for controlling a wind turbine as part of a wind power plant based on taking into account the vibration load of the drive and timely preparation of the process of making control decisions under different operating modes of the power unit]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 79-87 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2023-1-79-87.
18. Nazarov M.H. *Optimizaciya i planirovanie rejimov avtonomnoy energeticheskoy sistemi na osnove vobnovlyаемih i alyternativnykh 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.).
19. Shkljarskij J.E., Batueva D.E. *Razrabotka algoritma vibora rejimov raboti kompleksa elektrosnabzheniya s vetrodozelynoy elektrostanciey* [Working out of algorithm of a choice of operating modes of a complex of electrosupply with wind diese power plant]. *Zapiski gornogo instituta*. 2022, vol. 253, pp. 115-126 (in Russ.). DOI:10.31897/PMI.2022.7.

* * *

Wind Power Station Efficiency Increase Methods Based on Wind Turbine Condition Process Mathematical Modelling when Distributing Electric Power Between the Consumers in Arctic and Far North Regions

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, State budgetary educational institution of a city of Sevastopol Average comprehensive school No. 23

The relevance of wind power plant efficient control method based on wind turbine condition process mathematical modeling is proved for electric power distribution between consumers, intended to minimize decision-making time on technological process redistribution of electric power production for another consumer by means of actual information on equipment failure time (wind turbine, electric power stocking system), that provides optimum power production and consumption planning in northern regions.

The review of the basic mathematical modeling methods of electric power redistribution between consumers that showed there are certain problem statements with insufficient descriptions of mathematical models or the absence of

ready and effective methods to solve them, in particular, wind turbine condition process mathematical modeling for electric power distribution to consumers in northern regions.

As a result of the analysis of wind power plant efficient control method on the basis of wind turbine condition process mathematical modeling to distribute electric power to consumers in northern regions game theory and pulse system functioning mathematical methods application based on difference equations is expedient.

The decision-making strategies stipulated by "nature" (working capacity or wind turbine failure), the scheduler (repair or wind turbine redistribution) and a condition of phase co-ordinate (repair, idle, redistribution or operation wind turbine modes) are defined.

On the basis of the accepted strategy and use of step function Heaviside $F(\tau)$ for fixing of technological process time, the description of the wind turbine condition equation was made providing operative failure time information access on because due to idle time, redistribution or repair that provides optimum electric power production planning for a consumer.

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

Получено: 23.01.24

Образец цитирования

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.

For Citation

Buyalsky V.I. [Wind Power Station Efficiency Increase Methods Based on Wind Turbine Condition Process Mathematical Modelling when Distributing Electric Power Between the Consumers in Arctic and Far North Regions]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 32-40. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-32-40.