

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-26-33

Математическое моделирование состояния процесса ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления

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

Сделан анализ, что эффективное управление ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах на ограниченном количестве (в одну единицу оборудования) ветроагрегатов для каждого объекта потребления не обеспечивает должным образом необходимых объемов мощности потребляемой электроэнергии.

Определено, что для обеспечения должным образом необходимых объемов мощности потребляемой электроэнергии каждому потребителю актуальным является подход эффективного управления ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления.

Выполнено описание уравнения состояния оборудования (ветротурбина, накопительная система электроэнергии) при перераспределении на первый, второй, третий или четвертый технологические процессы производства электроэнергии с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления.

Выполнено описание уравнения состояния процесса ветроэнергоустановки, определяющее объем выработанной электроэнергии для каждого потребителя на основе обеспечения динамики изменения объема потребляемой электроэнергии объекту потребления в результате фиксации объема выработанной электроэнергии к определенному временному шагу с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления.

Для фиксации времени отказа единицы оборудования произведено описание уравнения расчета времени простоя всего оборудования (ветротурбина, накопительная система электроэнергии) по причине перераспределения, ремонта или слабый/сильный ветер с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления.

Для изменения значения индексов S_i , определяющего загрузку энергоагрегатов и накопительной системы электроэнергии, характеризующие, тот или иной технологический процесс входящего в состав математической модели состояния процесса ветроэнергоустановки для определения объема выработанной электроэнергии для каждого потребителя, произведено описание уравнения с учетом укрупнения энергоагрегатов объекту потребления.

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

Введение

Научно-исследовательские и производственно-технические работы в области распределения электрической энергии проводятся во многих странах мира.

О масштабах этих работ можно судить по большому количеству публикаций и проведенных международных и региональных конференций, симпозиумов и семинаров, на которых рассматривался широкий круг исследований по проблеме распределения электрической энергии как для небольших потребителей, так и в системах централизованного электроснабжения.

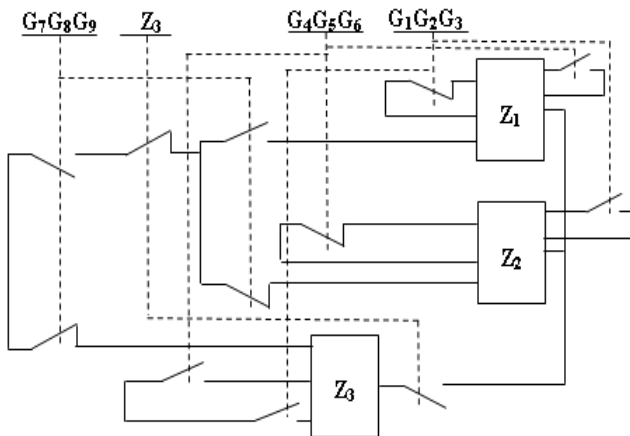
Вместе с тем существуют определенные постановки задач, для которых недостаточно широко описаны математические модели или нет готовых и эффективных методов их решения, в частности математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах [1–16].

Целью выполненных исследований является описание математической модели состояния процесса ветроэнергоустановки при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах с учетом увеличения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления.

Уравнение состояния ветроэнергостанции

Эффективное управление ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса ветроэнергостанции при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах, предложенное в [17], базируется на ограниченном количестве ветроагрегатов для каждого объекта потребления и составляет одну единицу оборудования на каждого потребителя. Предложенный подход не обеспечивает должным образом необходимых объемов мощности потребляемой электроэнергии потребителю.

Таким образом, в данной статье предложен подход эффективного управления ветроэлектростанцией на основе математического моделирования учета состояния процесса ветроэнергостанции при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах с n -м количеством энергоагрегатов для каждого объекта потребления, что обеспечивает необходимый объем мощности электроэнергии (рисунок).



Структурная схема
технологических процессов
The block diagram
of technological processes

1) В соответствии со структурной схемой (рисунок) стратегии природы определяются для каждой k -й ветротурбины, образующей i -й технологический процесс:

- $V^k = 1$ – ветротурбина в рабочем режиме;
- $V^k = 0$ – отказ ветротурбины.

2) Стратегии планировщика загрузки ветротурбины:

$u^k = 1$ – перераспределение ветротурбины на производство электроэнергии другому потребителю;

$u^k = 0$ – ремонт ветротурбины при отказе или слабом/сильном ветре;

$c^k = 1$ – перераспределение невозможно;

$c^k = 0$ – перераспределение возможно.

Важным фактором является фиксация времени отказа какой-либо единицы оборудования, входящей в состав того или иного технологического процесса, поскольку от данного момента отсчитывается время перераспределения или ремонта (в зависимости от выбранной стратегии), в течение которого будет осуществляться простой соответствующей k -й единицы оборудования.

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

$$\begin{cases} \frac{dT_{\text{отк}}^1}{dt} = \left(\left(1 - \prod_{k=1}^n V_1^k \right) T - T_{\text{отк}}^1 \right) \\ \frac{dT_{\text{отк}}^2}{dt} = \left(\left(1 - \prod_{k=1}^n V_2^k \right) T - T_{\text{отк}}^2 \right) \\ \frac{dT_{\text{отк}}^3}{dt} = \left(\left(1 - \prod_{k=1}^n V_3^k \right) T - T_{\text{отк}}^3 \right) \end{cases}$$

Уравнение состояния оборудования при перераспределении на первый, второй, третий или четвертый технологические процессы с учетом коммутации n количества энергоагрегатов каждому потребителю в общей форме:

$$\frac{dx_i}{dt} = S' \cdot V^i \left[\begin{array}{l} \left[\prod_{k=1}^n V_l^k + 0,5 \left(1 - \prod_{k=1}^n V_l^k \right) \cdot \left(1 - \Phi \left(T - T_{отк}^l, t_{пер}^n \right) \right) \cdot u^k \left(1 - c^k \right) - 0,5 \cdot \right. \\ \left. \left(1 - \prod_{k=1}^n V_l^k \right) \cdot \left(1 - \Phi \left(T - T_{отк}^l, t_{рем}^k \right) \right) \cdot \left(1 - u^k \right) \cdot \left(1 - c^k \right) + \left(1 - \prod_{k=1}^n V_l^k \right) \cdot \right. \\ \left. \Phi \left(T - T_{отк}^l, t_{ожид}^k \right) \cdot \left(1 - u^k \right) \cdot \left(1 - c^k \right) - 0,5 \left(1 - \prod_{k=1}^n V_l^k \right) \cdot \right. \\ \left. \left(1 - \Phi \left(T - T_{отк}^l, t_{рем}^k \right) \right) \cdot \left(1 - u^k \right) \cdot c^k \right] \end{array} \right] - X_i \quad (1)$$

В уравнении (1) приняты следующие обозначения: $S' = ((1 - S_3 - S_1) \vee S_1) \vee (S_3(S_1 - S_2))$,

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

$S' = S_3 \cdot S_1 \cdot S_2$, $S' = (1 - S_1) \cdot (1 - S_2)$, то есть производство электроэнергии для первого, второго или третьего потребителя. Составляющий элемент $1 - \prod_{k=1}^n V_l^k$ при равенстве 1 стратегии V^k определяет работоспособность всех n энергоагрегатов ($n = 3$), входящих в l -й технологический процесс ($l = 1 \vee 2 \vee 3$). Ступенчатая функция Хэвисайда интерпретируется следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \left(T - T_{отк}^i, t_{пер}^n \right) \\ \Phi \left(T - T_{отк}^i, t_{рем}^k \right) \\ \Phi \left(T - T_{отк}^i, t_{ожид}^k \right) \end{array} \right\} = \begin{cases} 0 & \text{при } \left\{ \begin{array}{l} T - T_{отк}^i \leq t_{пер}^n \\ T - T_{отк}^i \leq t_{рем}^k \\ T - T_{отк}^i \leq t_{ожид}^k \end{array} \right. \\ 1 & \text{при } \left\{ \begin{array}{l} T - T_{отк}^i > t_{пер}^n \\ T - T_{отк}^i > t_{рем}^k \\ T - T_{отк}^i > t_{ожид}^k \end{array} \right. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет зафиксировать номер реализуемого технологического процесса, в котором энергоагрегат может находиться в одном из четырех состояний: перераспределение, ремонт, простой по причине слабого/сильного ветра (при соответствующей стратегии u^k).

Логическое толкование сформированного уравнения (1):

1) ветротурбины G_7 , G_8 , G_9 (или накопительная система электроэнергии Z_3 (рисунок)) находятся в состоянии перераспределения на

производство электроэнергии другому потребителю;

2) ветротурбина G_1 , G_2 и/или G_3 либо G_4 , G_5 и/или G_6 находится в состоянии простоя по причине «собственного» ремонта (принята соответствующая стратегия ремонта u^k), перераспределение энергоагрегатов G_7 , G_8 , G_9 возможно $1 - c^k$;

3) ветротурбины G_1 , G_2 , G_3 и G_4 , G_5 , G_6 находятся в состоянии простоя по причине ожидания рабочей скорости ветра (принята соответствующая стратегия слабый/сильный ветер u^k), перераспределение оборудования возможно $1 - c^k$;

4) ветротурбина G_7 , G_8 и/или G_9 находится в состоянии простоя по причине «собственного» ремонта (принята соответствующая стратегия ремонта u^k), перераспределение оборудования невозможно c^k , обусловленное отсутствием негативного влияния на производство электроэнергии потребителям Z_1 и Z_2 .

Таким образом, принимая во внимание вышеизложенное, следует отметить, что перераспределение ветроагрегатов G_7 , G_8 и G_9 для производства электроэнергии другому потребителю (технологический процесс № 1 или 2) осуществляется в полном составе, что предусматривает одинаковое количество ветрогенераторов в каждом технологическом процессе (№ 1, 2 и 3).

Математическое моделирование состояния процесса ветроэнергоустановки для определения объема выработанной электроэнергии при n единиц оборудования на каждого потребителя

Подход по математическому моделированию состояния процесса ветроэнергоустановки для определения объема выработанной электроэнергии при коммутации n единиц

оборудования на каждого потребителя определен с методикой, изложенной в [18]. Уравнения, описывающие динамику измене-

ния объема W_i выработанной электроэнергии для каждого потребителя, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dW_1}{dt} = ((1-S_3-S_1) \vee S_1) \vee (S_3(S_1-S_2)) \cdot \delta(T \cdot W_{\text{ном}} - 0,5W_4 t_{\text{выр}}^4 - T_{\text{прост}}, (C_1 + W_{\text{ном}}) t_{\text{выр}}^1) \\ \frac{dW_2}{dt} = ((1-S_3-S_2) \vee S_2) \vee (S_3(S_2-S_1)) \cdot \delta(T \cdot W_{\text{ном}} - 0,5W_4 t_{\text{выр}}^4 - T_{\text{прост}}, (C_2 + W_{\text{ном}}) t_{\text{выр}}^2) \\ \frac{dW_3}{dt} = (S_3 \cdot S_1 \cdot S_2) \cdot \delta(T \cdot W_{\text{ном}} - 0,5W_4 t_{\text{выр}}^4 - T_{\text{прост}}, (C_3 + W_{\text{ном}}) t_{\text{выр}}^3) \\ \frac{dW_4}{dt} = (1-S_1) \cdot (1-S_2) \cdot \delta(T \cdot 2W_{\text{ном}} - 2W_l t_{\text{выр}}^l - T_{\text{прост}}, (C_4 + 2W_{\text{ном}}) t_{\text{выр}}^4) \end{cases} \quad (3)$$

В уравнении (3) переменные W_i, l имеют следующие назначения:

W_1, W_2, W_3 – объем производимой электроэнергии для потребителей Z_1, Z_2, Z_3 соответственно;

W_4 – объем электроэнергии от накопительной системы Z_3 , передаваемой потребителям Z_1 и Z_2 ;

$W_{\text{ном}}$ – необходимый объем электроэнергии каждому потребителю за промежуток времени $\Delta t = 1$ час;

$l = 1 \wedge 2$ – технологические процессы № 1 и 2.

При формировании уравнения состояния технологического процесса, определяющего объем произведенной электроэнергии для каждого потребителя (3), использована дельта-функция Дирака:

$$\begin{cases} \delta(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{пер}}^n) \\ \delta(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{рем}}^k) \\ \delta(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{ожид}}^k) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{где } \delta = 0 \text{ при } \begin{cases} T - T_{\text{отк}}^i \neq t_{\text{пер}}^n \\ T - T_{\text{отк}}^i \neq t_{\text{рем}}^k \\ T - T_{\text{отк}}^i \neq t_{\text{ожид}}^k \end{cases}$$

$$\frac{dT_{\text{прост}}}{dt} = \left[\begin{aligned} & \left(1 - \prod_{k=1}^n V_1^k \right) \cdot ((1-S_3-S_1) \vee S_1) \vee (S_3(S_1-S_2)) \cdot (E_1^1 + E_1^2 + E_1^3 + E_1^4) + \\ & \left(1 - \prod_{k=1}^n V_2^k \right) \cdot ((1-S_3-S_2) \vee S_2) \vee (S_3(S_2-S_1)) \cdot (E_2^1 + E_2^2 + E_2^3 + E_2^4) + \\ & \left(1 - \prod_{k=1}^n V_3^k \right) \cdot S_3 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot (E_3^1 + E_3^2 + E_3^3 + E_3^4) + \\ & \left(1 - \prod_{k=1}^n V_4^k \right) \cdot (1-S_1) \cdot (1-S_2) \cdot (E_4^1 + E_4^2 + E_4^3 + E_4^4) \end{aligned} \right]$$

$$\delta = 1 \text{ при } \begin{cases} T - T_{\text{отк}}^i = t_{\text{пер}}^n \\ T - T_{\text{отк}}^i = t_{\text{рем}}^k \\ T - T_{\text{отк}}^i = t_{\text{ожид}}^k \end{cases}$$

Таким образом, согласно (4) в (3) первый аргумент функции Дирака определяет текущее время T выработки электроэнергии, второй – характеризует требуемое значение времени T генерации следующего необходимого объема электроэнергии, $W_l t_{\text{выр}}^l$ – время, затраченное на производство электроэнергии другим технологическим процессом, $T_{\text{прост}}$ – время простоя оборудования, входящего в тот или иной технологический процесс по причине перераспределения, ремонта или слабого/сильного ветра.

Таким образом, уравнение для расчета времени простоя всего оборудования (ветротурбина, накопительная система электроэнергии) по причине перераспределения, ремонта или слабого/сильного ветра (при отказе) может быть определено следующим образом:

где

$$\begin{aligned}
 E_1^1 &= \left(1 - \prod_{k=1}^n V_1^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{пер}}^n\right)\right) \cdot u_1(1 - c_1); E_1^2 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_1^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{рем}}^k\right)\right) \times \\
 &\times (1 - u_1) \cdot (1 - c_1); E_1^3 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_1^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{ожид}}^k\right)\right) \cdot (1 - u_1) \cdot (1 - c_1); E_1^4 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_1^k\right) \times \\
 &\times \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{рем}}^k\right)\right) \cdot c_1, \\
 E_3^1 &= \left(1 - \prod_{k=1}^n V_3^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{пер}}^n\right)\right) \cdot u_3(1 - c_3); E_3^2 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_3^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{рем}}^k\right)\right) \times \\
 &\times (1 - u_3) \cdot (1 - c_3); E_3^3 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_3^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{ожид}}^k\right)\right) \cdot (1 - u_3) \cdot (1 - c_3); E_3^4 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_3^k\right) \times \\
 &\times \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{рем}}^k\right)\right) \cdot c_3, \\
 E_4^1 &= \left(1 - \prod_{k=1}^n V_4^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{пер}}^n\right)\right) \cdot u_4(1 - c_4); E_4^2 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_4^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{рем}}^k\right)\right) \times \\
 &\times (1 - u_4) \cdot (1 - c_4); E_4^3 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_4^k\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{ожид}}^k\right)\right) \cdot (1 - u_4) \cdot (1 - c_4); E_4^4 = \left(1 - \prod_{k=1}^n V_4^k\right) \times \\
 &\times \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{рем}}^k\right)\right) \cdot c_4.
 \end{aligned}$$

Уравнение состояния технологического процесса (смены технологического процесса) предложено в виде:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= \left(1 - \prod_{k=1}^n V_1^k\right) \cdot ((1 - S_3 - S_1) \vee S_1) \vee (S_3(S_1 - S_2)) \cdot \left(\Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{пер}}^n\right)\right) u^k \times \\
 &\times \left(1 - \prod_{k=1}^n V_2^k\right) \cdot ((1 - S_3 - S_2) \vee S_2) \vee (S_3(S_2 - S_1)) \cdot \left(\Phi\left(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{пер}}^n\right)\right) u^k \times \\
 &\times \left(1 - \prod_{k=1}^n V_3^k\right) \cdot (S_3 \cdot S_1 \cdot S_2) \cdot \left(\Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{пер}}^n\right)\right) u^k - \\
 &- \left(1 - \prod_{k=1}^n V_4^k\right) \cdot (1 - S_1) \cdot (1 - S_2) \cdot \left(\Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{пер}}^n\right)\right) u^k.
 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Начальные условия в (5). Так как расчет решения (поиск оптимальных управляющих воздействий) должен осуществляться при начальных перераспределениях n ветротурбин на производство электроэнергии для первого, второго и третьего потребителя, то реализация такого расчета основывается на одном варианте начальной загрузки.

Таким образом, вид начального условия: $\{t_*, nx_*^1 \wedge nx_*^2 \wedge nx_*^3\}$, где $t_* = t_0$, $nx_*^1 \wedge nx_*^2 \wedge nx_*^3$ – установка n ветротурбин на производство электроэнергии для первого, второго и третьего потребителей.

Анализ полученных результатов и выводы

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- обоснована актуальность математического моделирования состояния процесса ветроэнергостановки, определяющего объем выработанной электроэнергии для каждого потребителя с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления;
- для описания уравнения состояния оборудования при перераспределении на технологические процессы производства электроэнергии с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления введен со-

ставляющий элемент $1 - \prod_{k=1}^n V_l^k$, определяющий работоспособность всех n энергоагрегатов, входящих в технологический процесс;

– выполнено описание уравнения состояния процесса ветроэнергоустановки, определяющее объем выработанной электроэнергии для каждого потребителя на основе обеспечения учета динамики изменения объема требуемой электроэнергии для объекта потребления с учетом увеличения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления;

– произведено описание уравнения для расчета времени простоя всего оборудования по причине перераспределения, ремонта или слабого/сильного ветра с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления;

– выполнено описание уравнения изменения значений индексов S_i , определяющих загрузку энергоагрегатов и накопительную систему электроэнергии с учетом увеличения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления.

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., Голумзода 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 электроснабжающей 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 энергостоимостного 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. Баилова 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. 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 декабрь 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. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Буяльский В. И. Математическое моделирование состояния процесса ветроэнергоустановки определения объема выработанной электроэнергии для каждого потребителя. // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 4. С. 45–51. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-45-51.

References

1. Golumzoda A.H. *Novie tehnologii upravleniya sinhronizatsiei i vosstanovleniem normalnogo rejima elektricheskikh setey s raspredelennoy maloy generatsiei* [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 tekhnicheskogo 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 geosursov*. 2019. Vol. 330, pp. 173-180 (in Russ.).
5. Pazderin A.A. *Razrabotka modeli energo-stoimostnogo raspredeleniya i ee primeneniye 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 raspredeleniye*. 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. *Prognozirovaniye 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., Pekar-chik O.A.. *Optimizatsiya mejsistemnih peretokov vo vzaimodeystviyuschiy energoobyedineniyah* [Optimization of intersystem overflows in co-operating power associations]. *Energoberejenie – vajneyshee uslovie inovatsionnogo razvitiya APK: materialy Mejdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [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. *Sovershenstvovaniye metodov upravleniya peredachei i raspredeleniem elektroenergii v adaptivnykh sistemakh elektrosnabzheniya stacionarnykh potrebitel'nykh jeleznnykh 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. Nazarov M.H. *Optimizatsiya i planirovaniye rezhimov avtonomnoy energeticheskoy sistemi na osnove vozobnovlyayemykh 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.).
16. Shkljarskiy J.E., Batueva D.E. *Razrabotka algoritma vibora rezhimov raboti kompleksa elektrosnabzheniya s vetrodozelynoy elektrostanciei* [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.
17. 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.
18. Buyalsky V.I. [Mathematical modeling of the condition of process wind power plant of scoping of the developed electric power for each consumer]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 45-51 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2024-4-45-51.

Mathematical Modeling of Wind Turbine Process Condition at Electric Power Distribution in Northern Regions with Regard to Increasing the Number of Power Units for Each Consumption Object

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

The analysis showed that efficient wind power plant control based on mathematical modeling of wind turbine process condition at electric power distribution to consumers in northern regions with wind turbine limited quantity (one unit of equipment) for each consumption object does not provide necessary electric power volumes.

It is defined, to provide each consumer with necessary electric power volumes the approach of efficient wind power plant control on the basis of mathematical modeling with regard to wind turbine process condition is relevant when distributing electric power to consumers in northern regions and increasing the number of power units for each object of consumption.

The description of an equipment condition equation (wind turbine, electric power storage system) is performed under redistribution to the first, second, third or fourth technological processes of electric power production taking into account the increasing number of power units for each consumption object.

The description of wind turbine process condition equation, defining the electric power volume produced for each consumer on the basis of dynamic pattern volume of electric power demanded to consumption object as a result of produced electric power volume recording to a certain time step taking into account the increasing number of power units for each consumption object is performed.

To fix the idle time for an equipment unit (wind turbine, electric power storage system) due to redistribution, repair or a weak/strong wind taking into account the increasing number of power units the description of the idle time equation of all equipment is made for each object of consumption.

To change the value of indexes S_p , defining power unit loading and electric power storage system, characterizing a technological process being a part of wind turbine process condition mathematical model scoping the produced electric power for each consumer, the equation description taking into account the increasing number of power units to consumption object is made.

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

Получено: 12.08.24

Образец цитирования

Буяльский В. И. Математическое моделирование состояния процесса ветроэнергостановки при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах с учетом укрупнения количества энергоагрегатов для каждого объекта потребления // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 1. С. 26–33. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-26-33.

For Citation

Buyalsky V.I. [Mathematical modelling of the condition of process wind turbine at distribution of the electric power to consumers in northern widths taking into account integration of quantity power units for each object of consumption]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 26-33. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-26-33.