

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-45-51

Математическое моделирование состояния процесса ветроэнергоустановки определения объема выработанной электроэнергии для каждого потребителя

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

Обоснована актуальность математического моделирования состояния процесса ветроэнергоустановки, определяющего объем выработанной электроэнергии для каждого потребителя на основе обеспечения учета динамики изменения объема требуемого электричества для каждого объекта потребления в северных широтах. Определено, что фактором влияния на динамику изменения объема требуемого электричества для каждого объекта потребления является непостоянство производства электроэнергии в необходимом количестве, связанное с простоями энергоагрегатов по причине слабого или сильного ветра либо на период планового или аварийного ремонта. Установлены режимы работы технологических процессов по загрузке оборудования (ветротурбина, накопительная система электрической энергии) для решения проблемы непостоянства производства электроэнергии в необходимом количестве, связанного с простоями энергоагрегатов по причине слабого или сильного ветра либо на период планового или аварийного ремонта. Выполнено описание уравнения состояния процесса ветроэнергоустановки, определяющего объем выработанной электроэнергии для каждого потребителя на основе обеспечения учета динамики изменения объема требуемой электроэнергии объекта потребления в результате фиксации объема выработанной электроэнергии к определенному временному шагу, а также введенной режимности работы технологических процессов по загрузке оборудования в результате влияния факторов на непостоянство производства электроэнергии в необходимом количестве, связанными с простоями энергоагрегатов по причине слабого или сильного ветра либо на период планового или аварийного ремонта. Для фиксации времени отказа единицы оборудования произведено описание уравнения расчета времени простоя всего оборудования (ветротурбина, накопительная система электрической энергии) по причине перераспределения, ремонта или слабого/сильного ветра. Данное уравнение является одним из компонентов уравнения состояния процесса ветроэнергоустановки, определяющего объем выработанной электроэнергии для каждого потребителя на основе обеспечения учета динамики изменения объема требуемой электроэнергии для каждого объекта потребления. Выполнено описание уравнения изменения значения индексов S_i , определяющих загрузку энергоагрегатов, и накопительной системы электрической энергии, характеризующей тот или иной технологический процесс, входящие в состав математической модели состояния процесса ветроэнергоустановки определения объема выработанной электроэнергии для каждого потребителя.

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 определения объема выработанной электроэнергии для каждого потребителя в северных широтах.

Уравнение состояния процесса ветроэнергоустановки, определяющее объем выработанной электроэнергии для каждого потребителя

В работе [17] произведено описание уравнения состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям в северных широтах. Предложенная математическая модель не определяет динамику изменения объема потребляемой электроэнергии для каждого потребителя.

Непостоянство производства электроэнергии в необходимом количестве связано с простоями энергоагрегатов по причине слабого или силь-

ного ветра либо на период планового или аварийного ремонта.

Таким образом, уравнения состояния процесса энергоагрегатов необходимы для подсчета объема производимой электроэнергии каждому потребителю, произведенной к концу суток (то есть когда $T = T_{сут}$).

Введем следующие обозначения:

W_1 – объем электроэнергии для потребителя Z_1 , производимой в ходе технологического процесса № 1;

W_2 – объем электроэнергии для потребителя Z_2 , производимой в ходе технологического процесса № 2;

W_3 – объем электроэнергии для потребителя Z_3 , производимой в ходе технологического процесса № 3;

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

Постановка задачи, описания уравнений состояния процесса энергоагрегатов предполагает, что потребитель Z_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.

Таким образом, оборудование потребителя Z_3 должно перераспределяться в технологические процессы № 1 и 2 по причине отказа в результате ремонта или слабого/сильного ветра. Следовательно, потребитель Z_3 в одном случае выступает в роли накопителя электроэнергии (все три технологических процесса находятся в рабочем состоянии), а в другом случае выполняет функцию источника электроэнергии, расходуя запасенную энергию в период простоя технологических процессов № 1 и 2. Исходя из вышеизложенного, система должна работать в одном из двух режимов обеспечения электроэнергией потребителей Z_1 и Z_2 : режим № 1, когда электроэнергия производится ветрогенератором; режим № 2 – при использовании запасенной электроэнергии накопительной системой. Таким образом, для идентификации режимов необходимо ввести индекс. 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. Сформулированные утверждения прокомментированы на основе структурной схемы технологических процессов (рис. 1).

Таким образом, при определении режимов № 1 и 2 необходимо ввести следующие пара-

метры, характеризующие загрузку технологических процессов (рис. 1):

– загрузка технологических процессов для потребителей Z_1 и Z_2 или Z_3 (режим № 1):

$$((1 - S_3 - S_1) \vee S_1) \vee (S_3(S_1 - S_2)) \wedge \wedge ((1 - S_3 - S_2) \vee S_2) \vee \vee (S_3(S_2 - S_1)) \vee S_3 \cdot S_1 \cdot S_2; \tag{1}$$

– загрузка технологических процессов для потребителей Z_1 и Z_2 от накопителя электроэнергии Z_3 (режим № 2):

$$(1 - S_1) \cdot (1 - S_2) \tag{2}$$

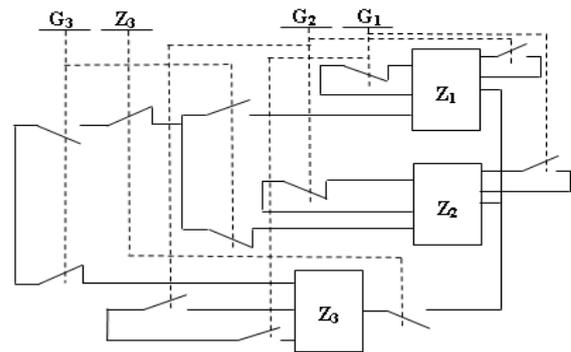


Рис. 1. Структурная схема технологических процессов

Fig. 1. The block diagram of technological processes

Рис. 2 характеризует вид функции $S'(t)$ реализации технологических процессов, определяющих работу режимов № 1, 2, где S' идентифицируется в соответствии с (1), (2).

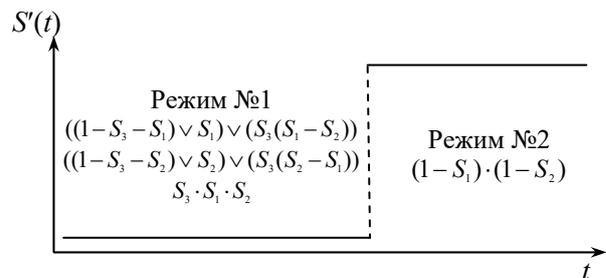


Рис. 2. Реализация технологических процессов, определяющих работу режимов № 1, 2

Fig. 2. Realization of the technological processes defining work of modes № 1, 2

Для формирования уравнений, определяющих динамику изменения W_1 , W_2 , W_3 и W_4 , введены четыре дополнительные переменные C_1 , C_2 , C_3 и C_4 , имеющие следующее толкование: C_1 – переменная, характеризующая необходимый объем электроэнергии, ранее выработанный (то есть полный объем электроэнергии, произведенный к определенному t_i временному шагу $C_1 = W_1^i$ при $t = t_i$). Значение переменной C_1 позволяет контролировать увеличение значения переменной

W_1 при сопоставлении соответствующих времен (текущего времени и времени, необходимого на производство требуемого объема электроэнергии потребителю Z_1). Толкование назначения переменных C_2 и C_3 аналогично. Введение переменной C_4 обусловлено необходимостью контролировать увеличение значения переменной W_4 , характери-

зующей производство электроэнергии от накопительной системы Z_3 для потребителей (Z_1 и Z_2) в результате простоя технологических процессов № 1 и 2 (рис. 1).

Таким образом, уравнения, описывающие динамику изменения объема выработанной электроэнергии, имеют следующий вид:

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

где $W_{\text{ном}}$ – необходимый объем электроэнергии каждому потребителю за промежуток времени $\Delta t = 1$ час, $l = 1 \vee 2$ – технологические процессы № 1, 2.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{пер}}^i), \\ \delta(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{рем}}^i), \\ \delta(T - T_{\text{отк}}^i, t_{\text{ожид}}^i), \end{array} \right. (4)$$

где

$$\delta = 0 \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} T - T_{\text{отк}}^i \neq t_{\text{пер}}^i, \\ T - T_{\text{отк}}^i \neq t_{\text{рем}}^i, \\ T - T_{\text{отк}}^i \neq t_{\text{ожид}}^i, \end{array} \right.$$

$$\delta = 1 \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} T - T_{\text{отк}}^i = t_{\text{пер}}^i, \\ T - T_{\text{отк}}^i = t_{\text{рем}}^i, \\ T - T_{\text{отк}}^i = t_{\text{ожид}}^i. \end{array} \right.$$

Таким образом, согласно (4) в (3) первый аргумент функции Дирака определяет текущее время T выработки электроэнергии, $W_4 t_{\text{выр}}^i$ – 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 слабый/сильный ветер.

Уравнение расчета времени простоя

Для расчета времени простоя необходимо фиксировать момент времени отказа единицы оборудования, входящей в технологический процесс. Для этого в модель введена переменная $T_{\text{отк}}$, которая описывается уравнением:

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

где V_1, V_2, V_3, V_4 – стратегии природы, связанные с работой либо отказом оборудования, входящие в технологические процессы № 1, 2, 3, 4 соответственно.

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

$$\begin{aligned}
E_1^1 &= (1-V_1) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{пер}}^1\right)\right) \cdot u_1 (1-c_1); E_1^2 = (1-V_1) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{рем}}^1\right)\right) \times \\
&\times (1-u_1) \cdot (1-c_1); E_1^3 = (1-V_1) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{ожид}}^1\right)\right) \cdot (1-u_1) \cdot (1-c_1); E_1^4 = (1-V_1) \times \\
&\times \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^1, t_{\text{рем}}^1\right)\right) \cdot c_1; \\
E_2^1 &= (1-V_2) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{пер}}^2\right)\right) \cdot u_2 (1-c_2); E_2^2 = (1-V_2) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{рем}}^2\right)\right) \times \\
&\times (1-u_2) \cdot (1-c_2); E_2^3 = (1-V_2) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{ожид}}^2\right)\right) \cdot (1-u_2) \cdot (1-c_2); E_2^4 = (1-V_2) \times \\
&\times \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^2, t_{\text{рем}}^2\right)\right) \cdot c_2; \\
E_3^1 &= (1-V_3) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{пер}}^3\right)\right) \cdot u_3 (1-c_3); E_3^2 = (1-V_3) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{рем}}^3\right)\right) \times \\
&\times (1-u_3) \cdot (1-c_3); E_3^3 = (1-V_3) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{рем/ож}}^3\right)\right) \cdot (1-u_3) \cdot (1-c_3); E_3^4 = (1-V_3) \times \\
&\times \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^3, t_{\text{рем}}^3\right)\right) \cdot c_3; \\
E_4^1 &= (1-V_4) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{пер}}^4\right)\right) \cdot u_4 (1-c_4); E_4^2 = (1-V_4) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{рем}}^4\right)\right) \times \\
&\times (1-u_4) \cdot (1-c_4); E_4^3 = (1-V_4) \cdot \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{ожид}}^4\right)\right) \cdot (1-u_4) \cdot (1-c_4); E_4^4 = (1-V_4) \times \\
&\times \left(1 - \Phi\left(T - T_{\text{отк}}^4, t_{\text{рем}}^4\right)\right) \cdot c_4.
\end{aligned} \tag{5}$$

Обозначения в (5) имеют следующие пояснения:

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

ступенчатая функция Хевисайда;

$u_i = 1$ – 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.

Тогда 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:

$$\frac{dT_{\text{прост}}}{dt} = \left[\begin{array}{l} (1-V_1) \cdot ((1-S_3 - S_1) \vee S_1) \vee (S_3(S_1 - S_2)) \cdot (E_1^1 + E_1^2 + E_1^3 + E_1^4) + \\ + (1-V_2) \cdot ((1-S_3 - S_2) \vee S_2) \vee (S_3(S_2 - S_1)) \cdot (E_2^1 + E_2^2 + E_2^3 + E_2^4) + \\ + (1-V_3) \cdot S_3 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot (E_3^1 + E_3^2 + E_3^3 + E_3^4) + \\ + (1-V_4) \cdot (1-S_1) \cdot (1-S_2) \cdot (E_4^1 + E_4^2 + E_4^3 + E_4^4) \end{array} \right] \tag{6}$$

Уравнение изменения значения индексов S_i

Уравнение для индексов S_1, S_2, S_3 в (6), определяющее загрузку энергоагрегатов и накопительной системы электроэнергии, характери-

зующее тот или иной технологический процесс, построено исходя из следующих соображений:

1. Изменение значения индексов должно происходить только при отказе оборудования в

уже реализуемом технологическом процессе, то есть $1 - V_i = 1$.

2. Изменение значения индексов S_1, S_2, S_3 должно осуществляться в момент окончания перераспределения, то есть $\Phi(T - T_{отк}^i, t_{пер}^i) = 1$.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= (1 - V_1) \cdot (1 - S_3 - S_1) \vee S_1 \vee (S_3(S_1 - S_2)) \cdot \left(\Phi(T - T_{отк}^1, t_{пер}^1) \right) u_1 \times \\ &\times (1 - V_2) \cdot (1 - S_3 - S_2) \vee S_2 \vee (S_3(S_2 - S_1)) \cdot \left(\Phi(T - T_{отк}^2, t_{пер}^2) \right) u_2 \times \\ &\times (1 - V_3) \cdot (S_3 \cdot S_1 \cdot S_2) \cdot \left(\Phi(T - T_{отк}^3, t_{пер}^3) \right) u_3 - \\ &- (1 - V_4) \cdot (1 - S_1) \cdot (1 - S_2) \cdot \left(\Phi(T - T_{отк}^4, t_{пер}^4) \right) u_4. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Начальные условия в (7). Так как расчет решения (поиск оптимальных управляющих воздействий) должен осуществляться при начальных перераспределениях ветротурбины на производство электроэнергии для первого, второго и третьего потребителя, то реализация такого расчета основывается на одном варианте начальной загрузки. Таким образом, вид начального условия: $\{t_*, x_*^1 \wedge x_*^2 \wedge x_*^3\}$, где $t_* = t_0$, $x_*^1 \wedge x_*^2 \wedge x_*^3$ – установка ветротурбины на производство электроэнергии для первого, второго и третьего потребителей.

Анализ полученных результатов и выводы

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

– обоснована актуальность математического моделирования состояния процесса ветроэнергоустановки, определяющего объем выработанной электроэнергии для каждого потребителя;

– установлены факторы влияния на динамику изменения объема требуемого электричества для каждого объекта потребления: слабый/сильный ветер, либо плановый или аварийный ремонт оборудования;

– определены два режима работы технологических процессов по загрузке оборудования: ветротурбина, накопительная система электрической энергии;

– 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;

– произведено описание уравнения для расчета времени простоя всего оборудования по

3. Должна быть применена соответствующая стратегия, то есть $u_i = 1$.

Исходя из этих рассуждений и в соответствии с рис. 2 уравнение состояния технологического процесса (смены технологического процесса) предложено в виде

причине перераспределения, ремонта или слабый/сильный ветер;

– выполнено описание уравнения изменения значения индексов S_i , определяющих загрузку энергоагрегатов, и накопительной системы электроэнергии.

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 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 СИМ-модели в АО «СО ЕЭС» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 2 (65). С. 26–31.

7. Воротицкий 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. 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.

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.

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 tehničeskogo 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 georesursov. 2019. vol. 330, pp. 173-180 (in Russ.).

5. Pazderin A.A. *Razrabotka modeli energostoimostnogo raspredeleniya i ee primeneniye v elektricheskikh setyah* [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 edinoi seti*. 2022. vol. 66-67, no. 5-6, pp. 14-24 (in Russ.).

11. Naumov V.A., Matison V.A, Fedorov U.G. [New of a direction of development of standardization in the course of digital transformation of electric power industry]. *Energiya edinoi 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. *Optimizatsiya mejsistemnih peretokov vo vzaimodeystvuyuschih 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. *Sovershenstvovanie metodov upravleniya peredachey i raspredeleniem elektroenergii v adaptivnih sistemah elektrosnabheniya stacionarnih potrebiteley jeleznyh dorog* [Perfection of control methods by transfer and electric power distribution in adap-

tive systems electric supply stationary consumers of railways]: PhD thesis. Omsk, 2022. 403 p. (in Russ.).

15. Nazarov M.H. *Optimizaciya i planirovanie rejimov avtonomnoy energetichskoy sistemi na osnove vozobnovlyаемih 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.).

16. 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.

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..

Mathematical Modelling of Wind Power Plant Electric Power Scoping Process State Being Developed for Each Consumer

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, State independent educational institution of vocational training of a city of Sevastopol development and formation Institute, Sevastopol, Russia

The relevance of wind power plant process state mathematical modeling, defining the volume of the developed electric power for each consumer on the basis of dynamic patterns of electricity demanded for each consumer in northern areas, is proved.

It is defined, that factors influencing on the dynamic patterns electricity demand by each consumer are electric power production variability due to power unit idle time because of a weak or strong wind, or in case of planned or emergency maintenance.

Technological process operating modes of capacity load (wind turbine, electric power storage system) to solve the problem electric power production variability due to power plant idle times because of a weak or strong wind, or to perform planned or emergency maintenance, are established.

The description of the process state equation of wind power plant, defining the volume of the developed electric power for each consumer accounting for dynamic patterns of demanded electric power by a consumer as a result of developed electric power volume fixing to a certain time step, and also by technological process operating mode factor that takes into account the capacity load as a result of factors affecting electric power production variability, due to power plant idle times because of a weak or strong wind, or to perform planned or emergency maintenance, is executed.

The description of the equation of equipment idle time calculation (wind turbine, electric power storage system) due to redistribution, maintenance or weak/strong wind is made. The given equation is a component of the wind power plant process state equation, defining volume of the developed electric power for each consumer on the account of the demanded electric power dynamic pattern demanded for each consumer.

The description of the equation of index variation S_b , defining power plant capacity load and electric power storage system, describing a technological process, as a part of wind power plant process state mathematical model for scoping the produced electric power for each consumer, is executed.

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

Получено: 20.06.24

Образец цитирования

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.

For Citation

Bujal'skij V.I. [Mathematical modeling of the state of the wind power plant process of determining the volume of generated electricity for each consumer]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 45-51. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-45-51.