

УДК 620.98

UDC 620.98

05.00.00 Технические науки

Engineering sciences

**ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПЛЕКСА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРНОГО ПОДХОДА И ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**

**OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF THE COMPLEX OF RENEWABLE ENERGY SOURCES WITH THE USE OF CLUSTER APPROACH AND THE THEORY OF RANDOM PROCESSES**

Гапоненко Александр Макарович  
д.т.н., профессор

Gaponenko Aleksandr Makarovich  
Dr.Sci.Tech., professor

Каграманова Александра Александровна  
аспирант

Kagramanova Aleksandra Aleksandrovna  
Postgraduate

*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия*

*Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia*

Рассмотрены гибридные нетрадиционные и возобновляемые источники энергии с точки зрения оптимизации их работы, основанной на знаниях технических и функциональных особенностей каждого. Использована классификация кластеров нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в зависимости от доли замещаемой мощности в энергозатратах, а также от вида нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Рассмотрена имитационная модель гибридного кластера с использованием структурной схемы и выполнена постановка задачи оптимизации путем полного и многофакторного эксперимента. Применены методы анализа нестационарных случайных процессов возмущающих воздействий

We have considered hybrid nontraditional and renewable sources of energy in terms of optimizing their work based on the knowledge of technical and functional peculiarities of each. We used classification of clusters of nontraditional and renewable energy of sources, depending on the proportion of replacing power in energy consumption and on the type of nontraditional and renewable energy of sources. We examined a simulation model of the hybrid cluster using the structural diagram and performed statement of the problem by means of the full and multifactor experiment. We applied the method of analysis of non-stationary random process disturbing influences

Ключевые слова: ОПТИМИЗАЦИЯ, КЛАСТЕРНЫЙ ПОДХОД, ТЕОРИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОГО КЛАСТЕРА

Keywords: OPTIMIZATION, CLUSTER APPROACH, THEORY OF RANDOM PROCESSES, SIMULATION MODEL OF HYBRID CLUSTER

**Оптимизация состава комплекса возобновляемых источников энергии с использованием кластерного подхода и теории случайных процессов**

Моноэнергетические возобновляемые источники энергии (ВИЭ) применяются в тех случаях, когда соблюдается определенный набор условий (погодных, географических и т.д), обеспечивающих их относительно бесперебойную работу. В реальности соблюдение таких условий является достаточно редким, и именно это обстоятельство в

значительной мере служит препятствием для широкого внедрения нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ). В качестве выхода предлагается использование гибридных систем, содержащих различные виды НВИЭ. Однако, использование таких гибридных систем в каждом случае требует оптимизации, основанной на знании технических и функциональных особенностей каждого из НВИЭ, входящего в состав гибридной системы. В данной работе предпринимается попытка разработать методику такой оптимизации при помощи кластерного подхода [1,2].

Кроме того, необходимо учесть случайные факторы, указанные выше, влияющие на работу гибридных систем НВИЭ [3].

Среди возобновляемых источников энергии широко распространены ветроэнергетические, малые гидроэнергетические (в том числе микро-, мини- и малые ГЭС), солнечные установки: солнечные коллекторы (СК), солнечные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), биогазовые установки (БГУ), дизель-генераторы (ДГ), а в числе нетрадиционных источников энергии (тепла) – тепловые насосы (ТН) с использованием низкопотенциального тепла грунта, сбросных вод очистных сооружений, тепловых стоков промышленных отходов или просто окружающего воздуха вплоть до небольших отрицательных температур.

Выше указанные источники энергии могут использоваться в различной конфигурации в составе гибридных установок, состоящих из дизель- или газогенератора (для гарантированного обеспечения энергией) и вариативного набора НВИЭ.

Известны гибридные ветро-солнечные, ветро-дизельные и дизель-ветро-солнечные установки, использующие два и три ВИЭ (соответственно, дуплекс и трио-системы). Следовательно, теоретически возможно наращивание резервирования систем с учетом местных, региональных или территориальных возможностей, до quadro- (четырёх),

пента- (пяти), сикстет- (шести), септ- (семи) видов НВИЭ в соответствующие кластеры (кластер – группа объектов с общими признаками).

Различные сочетания-кластеры могут быть востребованы только при определенных условиях (наличии соответствующих источников энергии), их рентабельность зависит от определенного выбора видов НВИЭ, соотношения замещаемых каждым НВИЭ мощностей и возможностей заказчика.

Для изучения вопроса о соотношении мощностей целесообразно использовать распределение кластеров НВИЭ на типы. Условно возможно распределить кластеры на типы [1]:

1. микро-кластер;
2. мини-кластер;
3. малый;
4. средний;
5. полный.

Каждый из выше указанных типов должен надежно обеспечить определенный уровень мощности (долю энергетических потребностей) от полной потребности в энергозатратах объекта, независимо от отсутствия какого-либо источника энергии (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1  
ДОЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОЩНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА КЛАСТЕРА

Тип кластера	Обозначение	Доля обеспечения мощности, %
Полный(Full)	F	100
Средний(Middle)	M	50
Малый(Small)	S	20
Мини-кластер(Emergency)	E	10
Микро-кластер(Aesthete)	A	5

Используя данную классификацию с долями обеспечения энергетических затрат необходимо понимать, что «полный кластер» F

обеспечивает уровень, соответствующий 100 % потребностей каждого потребителя, а тип «aesthete» (или микро-кластер А) создает условия обеспечения только 5% потребностей, которые могут обеспечить эстетическое освещение территории, но при возникновении аварийной ситуации может не хватить (например, функционирование мощной помпы при тушении пожара).

В качестве объектов потребления, использующих какой-либо вид кластеров, могут быть: отдельный дом-коттедж (F 10 кВт), многоквартирный дом (F 100 кВт), жилой поселок (F 200-500 кВт), микрорайон (F 500-10000 кВт), промышленное предприятие любой мощности и т.д. В соответствии с распределением кластеров на типы: микро-кластер «А» должен обеспечить для дома-коттеджа мощность 500 Вт, для многоквартирного дома 5кВт, для жилого поселка 10-25 кВт и т.д.

Оптимизация внутренней структуры по типам НВИЭ и мощностям является главным условием эффективности при построении энергетической системы на основе кластерного подхода. Решение данной задачи возможно при использовании многофакторного регрессивного анализа [2]. При «долевом» распределении между установками НВИЭ необходимо учесть, что гибридный энергетический кластер в любой момент времени должен обеспечить надежное покрытие нагрузок, соответствующим мощностям, представленным в табл. 1.

Оптимизация внутренней структуры кластера по типам и мощностям означает выбор установленной мощности для каждого вида оборудования НВИЭ, входящего в состав кластера гибридной энергосистемы.

Например, для микро-кластера А необходимой гарантированной долей (в соответствии с табл. 1) будут являться 5%, которые должен обеспечить дизель-генератор. Одновременно «гибридность» микро-кластера должна быть поддержана в дуплекс-системе ветроустановкой

соответствующей мощности, покрывающей те же 5% потребностей, либо другим видом ВИЭ.

Возможные сочетания НВИЭ по типам кластеров и долям мощности представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

ВОЗМОЖНЫЕ СОЧЕТАНИЯ НВИЭ ПО ТИПАМ КЛАСТЕРОВ И ДОЛЯМ  
МОЩНОСТИ

Тип кластера	Состав энергетического оборудования кластера	Покрываемая мощность, %
Микро-кластер НВИЭ (Aesthete) 5%		
Двойной гибрид А-2	ДГ+ВЭУ А-2	5%+5%
Трио-кластер А-3	ДГ+ВЭУ+ФЭП	5%+4%+1%
Квадро-кластер А-4	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН	4%+3%+0,5%+1,5%
Пента-кластер А-5	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+МГЭС	4%+2%+0%+1%+2%
Сикстет-кластер А-6	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+МГЭС+БГУ	3%+2%+0,5%+1%+2%+0,5%
Мини-кластер НВИЭ (Emergency) (10%)		
Двойной гибрид Е-2	ДГ+ВЭУ Е-2	10%+10%
Трио-кластер Е-3	ДГ+ВЭУ+ФЭП	10%+9%+1%
Квадро-кластер Е-4	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН	9%+7%+1%+2%
Пента-кластер Е-5	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+МГЭС	8%+5%+0,5%+1,5%+2%
Сикстет-кластер Е-6	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+МГЭС+БГУ	7%+2%+0,5%+1%+2%+0,5%
Малый кластер НВИЭ (Small) (20%)		
S-2	ДГ+ВЭУ	20%+20%
S-3	ДГ+ВЭУ+ФЭП	20%+15%+5%
S-4	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН	18%+15%+1%+4%
S-5	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+МГЭС	16%+7%+0,5%+2,5%+6%
S-6	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+МГЭС+БГУ	15%+2%+0,5%+1%+2%+0,5%
Средний кластер НВИЭ (Middle) (50%)		
M-2	ДГ+ВЭУ	50%+50%
M-3	ДГ+ВЭУ+ФЭП	50%+45%+5%
M-4	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН	45%+35%+2%+13%
M-5	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+МГЭС	40%+20%+2%+8%+20%
M-6	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+МГЭС+БГУ	35%+2%+0,5%+1%+2%+0,5%
Полный кластер НВИЭ (Full) (100%)		
F-2	ДГ+ВЭУ F-2	100%+100%
F-3	ДГ+ВЭУ+ФЭП	100%+90%+10%
F-4	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН	90%+80%+5%+15%
F-5	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН(СК)+МГЭС	80%+40%+4%+16%+40%
F-6	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН(СК)+МГЭС+БГУ	70%+35%+5%+15%+35%+15%

ТАБЛИЦА 3

**СОСТОЯНИЕ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ УСТАНОВЛЕННОЙ  
МОЩНОСТИ, ТЕКУЩЕЙ И ОЖИДАЕМОЙ СТОИМОСТИ ЭНЕРГИИ  
ОТ ВИЭ**

Технологии ВИЭ	Уровень установленной мощности и ее рост за 5 лет, ГВт (% в год)	Стоимость		
		удельная установленной мощности, \$/кВт	текущая энергии новых систем, ц/кВт·ч	ожидаемая в будущем, ц/кВт·ч
Электроэнергия ВЭУ	204 (25)	1100-1700	5-13	3-10
Фотоэлектричество	39,8 (30)	5000-10000	25-125	5-25
Электроэнергия от солнечных ТЭС	1,1 (5)	3000-4000	12-18	4-10
Низкопотенциальное тепло от солнечных установок	28 (т) (8)	500-1700	3-20	2-10
Электроэнергия от ГЭС:				
– мощных	672 (2)	1000-3500	2-8	2-8
– малых	35 (3)	1200-3000	4-10	3-10
Биомасса:				
– электричество	59 (3)	900-3000	5-15	4-10
– тепло	254 (3)	250-750	1-5	1-5

В настоящее время, перед российской возобновляемой энергетикой стоят задачи, требующие обновленного метода в решении проблемы устойчивого гарантированного и экономически целесообразного для удаленных объектов, регионов, территорий обеспечения энергией.

В качестве такого метода рационально использование расширенного комплексного применения различных видов НВИЭ (кластеров) с учетом природно-климатического потенциала определенного региона.

В зависимости от потребностей и возможностей заказчик (частные лица, мелкие производители, муниципалитеты) на удаленных территориях сам может выбрать тип кластера и соотношения по видам НВИЭ. В связи с этим мотивацией для роста интереса к НВИЭ является рост стоимости органических топлив, иссякаемость их запасов на планете и объективный

вектор на постепенное снижение удельных затрат при использовании НВИЭ в мире.

Рассмотрим имитационную модель гибридного кластера, следуя [2], которая в общем виде может быть представлена уравнением

$$\mathbf{G}_{\text{кл}} = \mathbf{f}[\mathbf{v}(\mathbf{A}, \mathbf{E}, \mathbf{S}, \mathbf{M}, \mathbf{F}); \mathbf{v}(\mathbf{d}, \mathbf{h}, \mathbf{k}, \mathbf{p}, \mathbf{s}, \mathbf{sp}); \mathbf{cC}_j, \mathbf{U}_j] \quad (1)$$

где  $G_{\text{кл}}$  – показатель эффективности гибридного кластера (комплекса НВИЭ);  $v$  – совокупность факторов воздействия внешней среды: скорость ветра (ВЭУ), инсоляция (ФЭП, СК), напор, расход (мГЭС), температура НПИ (ТН), режим метангенерации (БГУ);  $A, E, S, M, F$  – тип кластера в зависимости от доли замещаемой мощности (кластеры:  $A$  – микро;  $E$  – мини;  $S$  – малый;  $M$  – средний;  $F$  – полный);  $d, h, r, p, s, sp$  – тип кластера в зависимости от вида НВИЭ в системе:  $d$  – двойной гибрид (ДГ+ВЭУ или ДГ+ФЭП или ДГ+мГЭС и т.п.);  $h$  – трио-кластер (ДГ+ВЭУ+ФЭП или ДГ+ВЭУ+мГЭС);  $k$  – квадро-кластер (ДГ+ВЭУ+ФЭП+мГЭС);  $p$  – пента-кластер (ДГ+ВЭУ+ФЭП+мГЭС+ТН+БГУ);  $s$  – сикстет-кластер (ДГ+ВЭУ+ФЭП+мГЭС+ТН+БГУ);  $sp$  – септ-кластер (ДГ+ВЭУ+ФЭП+мГЭС+ТН+БГУ+СК);  $CC_j$  – себестоимость производства 1 кВт·ч разными видами НВИЭ;  $U_j$  – стоимость кВт установленной мощности вида НВИЭ.

В общем виде объект исследования можно представить в виде структурной схемы, показанной на рис. 1.

Рассмотрение объекта в виде такой схемы основано на принципе «черного ящика», который имеет следующие группы параметров:

1.  $X_i$  – управляющие (входные), которые называются факторами;
2.  $Y_i$  – выходные параметры, которые называются параметрами состояния;
3.  $W_i$  – возмущающие воздействия.

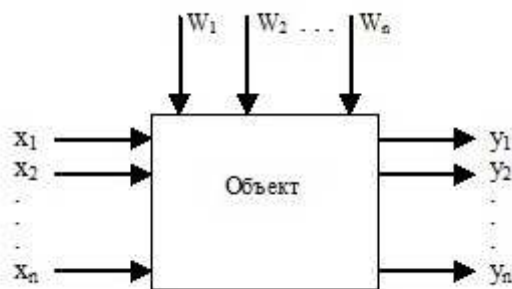


Рис. 1. Алгоритм математического анализа многофакторной модели для ВИЭ

Учитывая, что возмущающие воздействия  $W_i$  не поддаются контролю, следовательно, являются случайными или меняющимися во времени (скорость ветра, инсоляция, температура воздуха, грунта, теплоносителя).

Каждый фактор  $X_i$  имеет область определения, которая должна быть установлена до проведения эксперимента ( $CC_j$  – себестоимость выработки кВт·ч энергии или удельная стоимость оборудования  $U_j$  для 1 кВт установленной мощности).

Сочетание представленных факторов можно представить как точку в многомерном пространстве, описывающую состояние системы.

В реальных условиях цель многофакторного эксперимента заключается в установлении зависимости

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (2)$$

описывающей поведение объекта. Как правило, функция (2) строится в виде полинома

$$(3)$$

или

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{12}x_1x_2 \quad (4)$$

где  $x_i$  – управляющие параметры,  $a_i, a_{ij}$  – соответствующие коэффициенты, описывающие вклад каждого управляющего параметра.



Построение зависимости (2) при минимальном количестве измерений значений управляющих параметров  $x_i$  было целью эксперимента.

Известно, что оборудование на объекте «Энергоэффективный дом» имеет динамические характеристики. Следовательно, входные факторы и параметры объекта зависят от времени. Тогда задача идентификации объекта (построение функции отклика) во многом аналогична электротехническим задачам.

Для множества сложных объектов является характерным наличие случайных возмущений, и задача идентификации требует статистических методов для определения динамических характеристик.

Главная практическая задача заключается в определении оптимальных условий для исследуемого объекта. Как правило, при многофакторном эксперименте необходимо найти значения факторов  $x_i$  таких, при которых отклик системы  $y_i$  принимает значения  $y_{\max}$  или  $y_{\min}$ . Таким образом, строится целевая функция отклика

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (5)$$

и задача оптимизации сводится к определению  $x_{1\text{опт}}, x_{2\text{опт}}, \dots, x_{k\text{опт}}$ , обеспечивающих экстремум функции цели

$$y = y(x_{1\text{опт}}, x_{2\text{опт}}, \dots, x_{k\text{опт}}) = y_{\min}(y_{\max}) \quad (6)$$

Вместе с этим, на значения факторов накладываются дополнительные ограничения

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_k) \{ \leq \Rightarrow \} R_i \quad (7)$$

Следовательно, задачей оптимизации является нахождение экстремума функции отклика при условии, что сама функция априори неизвестна. Таким образом, экстремум будет означать минимальную стоимость оборудования, входящего в рассматриваемый кластер ВИЭ, при

минимальном сроке окупаемости комплекса. Эта задача может быть решена многими способами:

1. Посредством полного факторного эксперимента строится нелинейная модель функции отклика, и затем у этой функции находится экстремум. Такая модель может оказаться сложной и потребовать большого количества опытов, так как требования нахождения ее экстремума создают необходимость проведения полного факторного эксперимента в широком диапазоне варьирования и при большом числе опытов.
2. Наиболее практически приемлемым оказывается «пошаговый» подход к решению задачи нахождения экстремума. При этом эксперимент проводится в ограниченной области, то есть используется конкретный набор возмущающих воздействий  $W_i$  (скорость ветра, инсоляция). Определяется направление роста функции отклика (при нахождении максимума) или направление падения функции отклика (при нахождении минимума). Далее эксперимент проводится в следующей области и т.д. Таким образом, проводится последовательный поиск экстремума функции отклика. В этом случае задача оптимизации может быть решена без полного описания функции отклика во всей области варьирования факторов. Пошаговое движение происходит до падения функции в частный оптимум (экстремум функции в выбранном направлении).

В итоге пошагового движения обоими методами определяем квазистационарную область, близкую к точке оптимума. Эта область априори не может быть описана гиперплоскостью и требует описания в виде нелинейной модели (гиперболоида, параболоида и т.д.)

Определить оптимальную конфигурацию кластера ВИЭ для малых мощностей позволяет использование многофакторной модели.

В качестве критерия эффективности проектного решения можно принять критерий минимального разброса стоимости одного кВт·ч

отпускаемой кластером электроэнергии при заданном простом сроке окупаемости.

Допустим, имеем  $n+1$  источник энергии: будем считать не зависящей от случайных возмущений работу одного из них (например, работу дизеля). Назовем такой источник безрисковым. Работа оставшихся  $n$  источников ВИЭ подвержена случайным возмущениям (например, использование ветровой и солнечной энергии). Такие источники – рискованные.

Обозначения:  $a$  – количество электроэнергии, вырабатываемое кластером (в единицу времени);  $b$  – допустимый уровень средней стоимости 1 кВт·ч, вырабатываемого кластером;  $r_0$  – стоимость эксплуатации безрискового источника за единицу времени (содержится как стоимость оборудования, так и стоимость обслуживания);  $r_k$  – стоимость эксплуатации в течение часа  $k$ -типа оборудования из рискованных источников;  $x_0$  – доля (от  $a$ ), вырабатываемая безрисковым источником;  $x_k$  – доля (от  $a$ ), вырабатываемая  $k$ -рисковым источником.

Измеряемые случайные величины:  $Z_k$  – количество энергии, вырабатываемой за единицу времени  $k$ -рисковым источником.

Пусть для каждой из случайных величин  $Z_k$  имеется выборка из  $N$  наблюдений.

Вычисляемые (по выборке для  $Z_k$ ) случайные величины:

$$Y_k = \frac{r_k}{Z_k} \quad (8)$$

где  $Y_k$  – стоимость энергии, произведенного  $k$ -рисковым источником за единицу времени.

Далее получим для каждой из случайных величин  $Y_k$  выборку, также состоящую из  $N$  наблюдений:

$$Y/a = x_0 r_0 + x_1 Y_1 + x_2 Y_2 + \dots + x_n Y_n \quad (9)$$

где  $Y/a$  – стоимость энергии, вырабатываемой кластером за единицу времени (это случайная величина, тогда как первое слагаемое в правой части – неслучайно).

Находим для  $Y_k$  по выборкам:  $m_k$  – средняя стоимость энергии, вырабатываемой  $k$ -источником за единицу времени (выборочное среднее по  $Y_k$ );  $m_2$  – средняя стоимость 1 кВт·ч, вырабатываемого солнцем (выборочное среднее по  $Y_2$ );

$$m = M(Y/b) = x_0 r_0 + x_1 m_1 + x_2 m_2 \quad (10)$$

где  $m$  – средняя стоимость энергии, вырабатываемой кластером за единицу времени;  $b$  – допустимый уровень средней стоимости 1 кВт·ч, вырабатываемого кластером ( $b < r_0$ ).

Для объективного учета возмущающих воздействий, основным свойством которых является нестационарный случайный характер применим методы анализа нестационарных случайных процессов [3].

С целью обоснования ВИЭ для оценки влияния внешних климатических факторов традиционно применяют методы описательной статистики, которые сводятся к комбинированию двух основных подходов: 1) усреднения в пределах длительных интервалов времени, например, среднемесячные и среднегодовые значения; 2) использования статистических распределений, параметры которых также получены усреднением по времени, например, описание ветровых режимов распределением Вейбулла. Наряду с этим реальные геофизические процессы подвержены циклическим колебаниям как кратковременного (суточные циклы), так и долговременного характера (годовые циклы). Как правило, климатические данные представлены выборками небольшого объема. Эффективной заменой традиционных методов при малом времени реализации и наличии априорной информации о процессе могут служить

параметрические методы, применяемые в радиофизике, экономических и социальных исследованиях [4-12].

Существующие закономерности в климатических процессах приводят к нарушению стационарности их статистических свойств. Возможным способом описания таких процессов является исключение детерминированной компоненты и сведение к стационарным процессам. Поскольку климатические процессы подвержены годовым и суточным циклическим изменениям, для их описания можно применить теорию модулированных колебаний, которая широко используется в радиофизике и описана в работах [10,11].

Следовательно, детерминирующую составляющую таких процессов можно описать функцией

$$a(t) = (1 + M \cos(\Omega t + \psi)) \Phi(t), \quad (11)$$

где  $\Phi(t)$  – периодическая последовательность суточных колебаний;  $M$ ,  $\Omega$ ,  $\psi$  – амплитуда, частота и фазовый угол годовых колебаний.

Воздействие детерминированных факторов на случайный процесс в общем виде можно описать комбинацией аддитивной (12) и мультипликативной (13) моделей:

$$x(t) = a(t) + u(t) \quad (12)$$

$$x(t) = a(t)u(t) \quad (13)$$

где  $u(t)$  – реализация стационарного случайного процесса;  $a(t)$  – детерминированная функция.

Исключив детерминированную составляющую, оставшуюся часть можно считать случайной компонентой. Статистические свойства случайной составляющей процесса можно оценить, используя традиционно применяемые методы теории вероятности и математической статистики.

После определения закономерностей их можно исключить из исследуемых процессов. На этом этапе необходимо выбрать параметры модели, комбинируя зависимости (11) и (12). Эффективность мультипликативной и аддитивной моделей в исследуемом случайном процессе можно оценить по косвенным признакам, характерным для этих двух типов моделей [5]. В результате были получены формулы (14, 15, 16), выражающие соотношения детерминированной и случайной компонент для процессов изменения интенсивности солнечного излучения, температуры наружного воздуха и скорости ветра соответственно.

$$x(t) = (a(t) + A)u(t) + a(t)k \quad (14)$$

$$x(t) = u(t) + a(t) \quad (15)$$

$$x(t) = (a(t) + A)u(t) - B + a(t)k \quad (16)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $k$  – параметры моделей, определяющие соотношение детерминированной и случайной компоненты.

Остатки процессов изменения температуры наружного воздуха и интенсивности солнечного излучения хорошо описываются нормальным распределением. Распределение случайной компоненты изменений скорости ветра имеет асимметричную форму и с приемлемой точностью описывается функцией Вейбулла.

#### Заключение

1. Проведена классификация НВИЭ в зависимости от состава и уровня замещения мощности.
2. Рассмотрена имитационная модель гибридного кластера НВИЭ и определена структура функционала для показателей его эффективности.

3. Предложен «пошаговый» подход к решению задачи нахождения экстремума функции отклика нелинейной модели полного факторного эксперимента.
4. Описан алгоритм математического анализа многофакторной модели для НВИЭ с учетом случайного характера динамических характеристик.
5. Предложен метод описания климатических процессов, учитывающий нестационарность их статистических свойств. Суть метода состоит в исключении из исследуемого процесса закономерностей и последующей оценке параметров случайной компоненты. Применение моделей нестационарных случайных процессов на практике позволит снизить неопределенность учета внешних факторов в задачах обоснования схем энергоснабжения на основе ВИЭ и повысить достоверность принимаемых решений.

#### Список литературы:

1. Велькин В. И. Оптимизация выбора энергообеспечения на основе кластерного подхода в использовании возобновляемых источников энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». №02 (106). 2012. С. 61-66.
2. Велькин В.И., Логинов М. И. Выбор оптимального состава оборудования в кластере возобновляемых источников энергии на основе регрессионного анализа // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». №03 (107). 2012. С. 100-104.
3. Щеклеин С.Е., Власов В.В. Моделирование нестационарных случайных процессов в задачах обоснования возобновляемых источников энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». №03 (107). 2012. С. 67-71
4. Андерсон Т. Статический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного анализа и спектрального анализа: Пер. с англ. М.: Мир, 1983.
7. Бокс ДЖ., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974.
8. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Учеб. Пособие для вузов. 2-у изд., стер. М.: Высш. Шк., 2000.
9. Евланов Л.Г., Константинов В.М. Системы со случайными параметрами. М.: Наука, 1976.

10. Рытов С.М. Введение в статическую радиофизику. Ч.1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976.
11. Рытов С.М. Модулированные колебания и волны // Труды Физ. Института АН СССР. 1940. Т. 2, вып. 1.
12. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере / Под ред. В.Э. Фигурнова. 3-е изд., перераб. И доп. М.: ИНФРА-М, 2003.

### References

1. Vel'kin V. I. Optimizacija vybora jenergoobespechenija na osnove klasterного podhoda v ispol'zovanii vozobnovljaemyh istochnikah jenerгии // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Al'ternativnaja jenergetika i jekologija». №02 (106). 2012. S. 61-66.
2. Vel'kin V.I., Loginov M. I. Vybor optimal'nogo sostava oborudovanija v klasterе vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии na osnove regressionnogo analiza // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Al'ternativnaja jenergetika i jekologija». №03 (107). 2012. S. 100-104.
3. Shheklein S.E., Vlasov V.V. Modelirovanie nestacionarnyh sluchajnyh processov v zadachah obosnovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Al'ternativnaja jenergetika i jekologija». №03 (107). 2012. S. 67-71
4. Anderson T. Sticheskiy analiz vremennyh rjadov. M.: Mir, 1976.
5. Bendat Dzh., Pirsol A. Prikladnoj analiz sluchajnyh dannyh: Per. s angl. M.: Mir, 1989.
6. Bendat Dzh., Pirsol A. Primenenie korreljacionnogo analiza i spektral'nogo analiza: Per. s angl. M.: Mir, 1983.
7. Boks DZh., Dzenkins G. Analiz vremennyh rjadov. Prognoz i upravlenie. M.: Mir, 1974.
8. Ventcel' E.S. Teorija sluchajnyh processov i ee inzhenernye prilozhenija. Ucheb. Posobie dlja vtuzov. 2-u izd., ster. M.: Vyssh. Shk., 2000.
9. Evlanov L.G., Konstantinov V.M. Sistemy so sluchajnymi parametrami. M.: Nauka, 1976.
10. Rytov S.M. Vvedenie v staticheskuju radiofiziku. Ch.1. Sluchajnye processy. M.: Nauka, 1976.
11. Rytov S.M. Modulirovannye kolebanija i volny // Trudy Fiz. Instituta AN SSSR. 1940. Т. 2, вып. 1.
12. Tjurin Ju.N., Makarov A.A. Analiz dannyh na komp'jutere / Pod red. V. Je. Figurnova. 3-е изд., перераб. I доп. М.: INFRA-М, 2003.