

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-66-73

Повышение эффективности технологических процессов на основе критерия согласованной работы режимов обеспечения электроэнергией потребителей Арктики и Крайнего Севера

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

Обоснован подход организации эффективной работы технологических процессов с простым ветротурбины в результате ее отказа и последующего восстановления, обусловленный применением метода управления ветроэнергостановкой на основе своевременной подготовки системы к внешним возмущающим воздействиям (скорости ветра и электрической нагрузки), учета вибрационной нагруженности привода и образования льда на лопастях ветроколеса при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, что предусматривает эксплуатацию ветроэнергостановки в суровых условиях Арктики и Крайнего Севера и обеспечивает уменьшение вероятности состояния отказа оборудования на 10 %.

Упреждение скорости ветра и электрической нагрузки основывается на обстоятельном анализе факторов, влияющих на объем потребляемой электроэнергии в суровых условиях Арктики и Крайнего Севера. Установлено, что доступ к информации о динамике воздушного потока должен осуществляться в течение малых промежутков времени, и в качестве интервала осреднения следует принимать 10-минутный отрезок, длительность которого обеспечивает получение устойчивых значений средней скорости ветра и в синхронном сопоставлении принятого критерия для упреждения электрической нагрузки.

Предложен метод упреждения скорости ветра и электрической нагрузки как стационарных процессов, который реализует подход к их анализу посредством разложения в ряд полинома Чебышева, который аппроксимирует кривую процесса с большей точностью, формируя ее таким образом, чтобы обеспечивать минимальные отклонения от исходного процесса на всем интервале измерений.

Обоснован интервал времени выборки измеренных значений случайного процесса и алгоритм согласованной работы режимов обеспечения электроэнергией потребителей, что способствует возможности интеграции предложенного метода повышения эффективности ветроэлектростанции на основе математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям Арктики и Крайнего Севера в систему автоматического управления электротехнического комплекса.

Ключевые слова: упреждение, ветротурбина, распределение электроэнергии, технологический процесс, потребитель, режим работы, интервал времени.

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 критически важна роль возобновляемой энергетики и систем накопления энергии в совокупности с интеллектуальной энергетикой и повышением энергоэффективности.

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 [1–16]. Целью выполненных исследований является разработка критерия загрузки технологических процессов в соответствии с установленным интервалом времени выборки измеренных значений случайного процесса с последующим упреждением.

Организация эффективной работы технологических процессов с простым k -й ветротурбины в результате ее отказа и последующего восстановления

Перераспределение электроэнергии потребителям в северных широтах обусловлено наличием возмущающих воздействий, негативно влияющим на стабильную работу технологических процессов

производства электроэнергии, связанной с необходимостью получения электроэнергии с помощью ветровых электроустановок в сельскохозяйственных предприятиях, фермерских хозяйствах, хуторах, небольших рабочих и сельскохозяйственных поселках, промышленных объектах малой мощности, а также в районах, в которых отсутствует централизованное электроснабжение, и в оффшорных зонах, где ветропарки являются важным источником возобновляемой энергии. Одним из видов таких возмущений является зафиксированный отказ работы ветротурбин по причине простоя, связанного с нерабочим ветровым потоком (слабый/сильный ветер) или ремонтом и их последующее восстановление. Отказ k -й ветротурбины прерывает реализацию технологического процесса для некоторого i -го потребителя, после чего ветротурбина простаивает, находясь в состоянии восстановления после отказа. В общем виде значение длительности восстановления ветротурбины после отказа является случайным. Однако ветроэнергоустановка оборудована системой аварийной сигнализации. Сигналы выводятся на монитор центрального компьютера и оповещают о тех или иных функциональных неполадках. Кроме того, некоторые аварийные сигналы оповещают о том, что характеристики ветра выходят за рамки рабочих параметров турбины. Одна функциональная неполадка может вызвать нарушение нескольких параметров одновременно, и тогда на мониторе появляются одновременно несколько различных сигналов. То или иное сочетание сигналов говорит о конкретной неполадке. Подача любого аварийного сигнала останавливает турбину [17, 18].

Постановка задачи распределения электроэнергии потребителям предполагает, что реализация технологического процесса для некоторого i -го потребителя прерывается в связи с отказом k -й ветротурбины из n единиц оборудования (рис. 1). Тогда длительность восстановления ветротурбины, соответствующая типу отказа, является величиной, заданной в качестве входных данных при реализации процессов перераспределения электроэнергии потребителям.

Вместе с тем при отказе k -й ветротурбины время восстановления технологического процесса для n единиц оборудования определяется временем, необходимым в перераспределении группы ветротурбин для восстановления процесса производства электроэнергии потребителю (Z_1 и/или Z_2), которое в силу своей величины не может негативно влиять на требуемый (запланированный) объем производства электроэнергии объекту потребления.

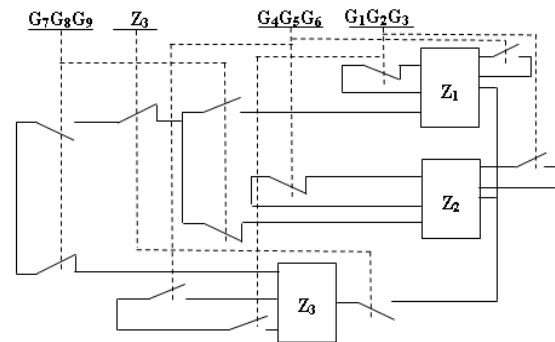


Рис. 1. Структурная схема технологических процессов

Fig. 1. The block diagram of technological processes

В то же время при отказе k -й ветротурбины технологического процесса № 1 или 2 перераспределение оборудования из $n - 1$ единиц осуществляется к потребителю Z_3 (рис. 1) с последующим восстановлением данной ветротурбины.

Период времени восстановления отказавшей k -й ветротурбины в данном случае является не критичным, но важным в вопросе должного обеспечения электричеством объекта потребления Z_3 как накопительной системы электроэнергии.

Необходимо отметить, что функционирование предложенного метода перераспределения электроэнергии потребителям осуществляется на ветроэлектростанции с оптимальным управлением ветроагрегатов на основе своевременной подготовки системы к внешним возмущающим воздействиям (скорости ветра и электрической нагрузки), учета вибрационной нагруженности привода и образования льда на лопастях ветроколеса при разных режимах эксплуатации энергоагрегата [19]. Таким образом, предложенный подход по управлению энергоагрегатом учитывает суровые условия эксплуатации ветроэнергоустановки в Арктике и Крайнем Севере и обеспечивает уменьшение вероятности состояния отказа оборудования на 10 %.

Таким образом, принимая во внимание вышеизложенное, можно сделать вывод, что организация работы технологических процессов с простоем k -й ветротурбины в результате ее отказа и последующего восстановления является эффективной. Вид перераспределения оборудования с простоем k -й ветротурбины в результате ее отказа и последующего восстановления представлен на рис. 2.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

$t_{\text{сост}}^{G_n i}$ — время нахождения n -ветротурбин i -го технологического процесса в состоянии работы,

перераспределения, ожидания; $t_{\text{сост}}^{G^i k}$ – время нахождения k -ветротурбины i -го технологического процесса в состоянии ремонта; $t_{\text{сост}}^{Z^3}$ – время нахождения накопительной системы электроэнергии в состоянии работы, перераспределения.

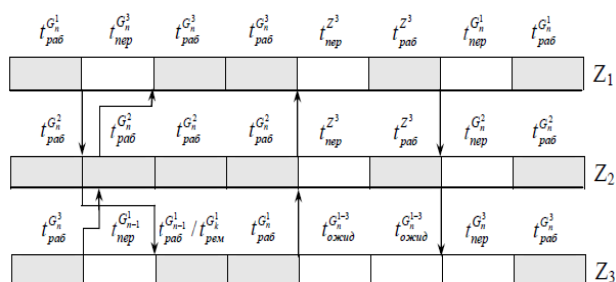


Рис. 2. Вид перераспределения оборудования с простоем k -й ветротурбины в результате ее отказа и последующего восстановления

Fig. 2. Kind of redistribution of the equipment with idle time of k -th wind turbine as a result of its refusal and the subsequent restoration

Упреждение скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии

Эффективность работы ветроэлектростанции в Арктике и Крайнем Севере для энергоснабжения автономных объектов предполагает планирование производства требуемого объема электроэнергии на сутки вперед. В то же время энергия ветрового потока и электрическая нагрузка имеют стохастический характер, что влияет на изменение графиков нагрузки в зависимости от продолжительности светового дня, сезонности и климатических условий для номинальной работы ветроэнергоустановки.

Таким образом, упреждение изменения скорости ветра позволит учитывать наличие рабочей энергии ветрового потока для обеспечения производства необходимого объема электроэнергии потребителям, а упреждение изменения электрической нагрузки даст возможность планировать необходимые объемы потребляемой электроэнергии и не допускать перебоев их поставки.

Принимая во внимание вышеизложенное, можно сделать вывод, что синхронный подход по упреждению скорости ветра и электрической нагрузки обеспечит своевременный доступ к информации выбора режимов работы электротехнического комплекса (ветротурбина или накопительная система электроэнергии). А также позволит заблаговременно определить состоя-

ние ветроэнергоустановки перераспределения генерации электроэнергии: потребители Z_1 и Z_2 получают электроэнергию от каждого технологического процесса № 1 и 2 соответственно или какого-либо из них № 1 или 2 (рис. 1).

Обстоятельный анализ результатов исследований по определению временной зависимости скорости ветра на продолжительных отрезках времени выполнен в [20].

Однако для разработки эффективных систем регулирования и управления режимами работы агрегатов, обеспечения устойчивой работы на промышленные электросистемы и дизельные электростанции требуется информация о динамике воздушного потока в течение малых промежутков времени, и в качестве интервала осреднения τ следует принимать 10-минутный отрезок, длительность которого обеспечивает получение устойчивых значений средней скорости ветра [21]. Исходя из вышеизложенного следует, что повышение эффективности ветроэлектростанции на основе математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям в Арктике и Крайнем Севере в качестве интервала осреднения скорости ветра (интервал упреждения ветрового потока) будет целесообразным принять 10-минутный отрезок в синхронном сопоставлении принятого критерия и для упреждения электрической нагрузки.

Предложенный подход позволяет обеспечить повышение устойчивой работы электротехнического комплекса, возможности планировать необходимые объемы потребляемой электроэнергии и не допускать перебоев их поставки при изменении графиков нагрузки в зависимости от продолжительности светового дня, сезонности и климатических условий для номинальной работы ветроэнергоустановки.

В работе [22] предложен метод для упреждения скорости ветра и электрической нагрузки как стационарных процессов, который реализует подход к их анализу посредством разложения в ряд полинома Чебышева. Исследование случайного процесса полиномами Чебышева позволяет, по аналогии с методом наименьших квадратов, аппроксимировать изменение среднего для стохастического процесса.

В то же время осуществляемое разложение случайных стохастических процессов в ряд по полиномам Чебышева аппроксимирует кривую процесса с большей точностью, формируя ее таким образом, чтобы обеспечивать минимальные отклонения от исходного процесса на всем интервале измерений.

Разложение случайного процесса в ряд по полиномам записывается следующим образом:

$$Y(\tau) = A_0 \psi_0(\tau) + A_1 \psi_1(\tau) + \dots + A_i \psi_i(\tau) + \dots$$

где через A_i обозначены коэффициенты разложения, определяемые на основе измеренных значений скорости ветра и известных значений полиномов в этих точках: ψ_i – полиномы, представляющие собой параболы i -го порядка.

Критерий загрузки технологических процессов

Для определения критерия загрузки технологических процессов воспользуемся следующими выводами.

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 не рабочего ветрового потока (рис. 1).

Энергия ветрового потока и электрическая нагрузка имеют стохастический характер, что влияет на изменение графиков нагрузки в зависимости от продолжительности светового дня, сезонности и климатических условий для номинальной работы ветроэнергоустановки; в частности, 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 групп ветрогенераторов G_n^1 и G_n^2 соответственно, а в летний период (при понижении нагрузки) потребление электроэнергии может быть ограничено одной группой ветрогенераторов (G_n^1 или G_n^2). «Освободившийся» технологический процесс перераспределяется для накопительной системы электричества (рис. 1).

Таким образом, критерий загрузки технологических процессов определяется двумя режимами:

– режим № 1 – загрузка технологических процессов G_n^1 и/или G_n^2 для потребителей Z_1 и Z_2 в зависимости от изменения нагрузки;

– режим № 2 – загрузка технологического процесса для потребителей Z_1 и Z_2 от накопительной системы электроэнергии Z_3 по причине ремонта G_k^1 и G_k^2 или нерабочего ветрового потока.

Обозначив мощность потребляемой электроэнергии через P , и принимая во внимание, что в июле потребление электроэнергии может быть меньше в 2 раза по сравнению с декабрем, получим критерий загрузки технологических процессов G_n^1 и/или G_n^2 для потребителей Z_1 и Z_2 в зависимости от изменения нагрузки с помощью соотношений:

$$Z_1, Z_2 \text{ при } \begin{cases} G_n^1 \wedge G_n^2, P > \frac{P_{\max}}{2}, \\ G_n^1 \vee G_n^2, P \leq \frac{P_{\max}}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальная мощность потребляемой электроэнергии, производимая ветрогенераторами технологических процессов G_n^1 и G_n^2 .

Интервал времени выборки измеренных значений случайного процесса описание алгоритма согласованной работы режимов обеспечения электроэнергией потребителей

Метод упреждения скорости ветра и электрической нагрузки состоит в том, что при измеренных значениях на некотором промежутке времени $[a, \tau]$ реализациях случайного процесса $Y(\tau)$, решение задачи оценки процесса на некоторый интервал упреждения $\Delta t > 0$ – нахождения реализации процесса в момент времени $\tau + \Delta t = t_{i+1}$.

Согласно [23] для повышения точности оценки число точек, в которых задано значение случайного процесса, составит $n = 60$, а расстояние между замерами $\tau = 1$ мин позволит уменьшить дисперсию измеренных значений. Тогда суммарное время выборки составит $\sum \Delta t = 60$ мин.

Временная схема согласованной работы режимов (рис. 3) аргументируется тем, что оценка случайного процесса реализуется программно, а измеренные значения записываются и сохраняются в файле и могут использоваться для по-

следующих интервалов упреждения. Таким образом, предложенный подход обеспечивает 10-минутный промежуток времени упреждения скорости ветра и электрической нагрузки ($\Delta t = 10$ мин), 60-минутный промежуток времени для получения информации об измеренных значениях случайного процесса, а также выбор со-

ответствующего режима для реализации ($\Delta t_i = 2$ мин), т. е. на начальном этапе измерение значений случайного процесса осуществляется на отрезке времени $\Delta t_1 = 60$ мин, а в последующих интервалах составит: $\Delta t_2 = 12$ мин.

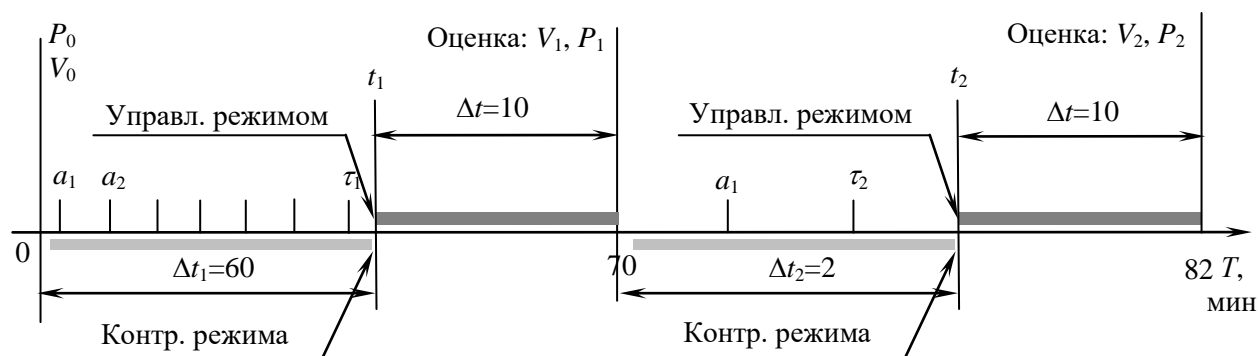


Рис. 3. Временная схема согласованной работы режимов

Fig. 3. The time scheme of the coordinated work of modes

Описание алгоритма согласованной работы режимов обеспечения электроэнергией потребителей

Согласованная работа режимов обеспечения электроэнергией потребителей определяется следующим образом:

- на начальном этапе ($\Delta t_1 = 60$ мин) осуществляется измерение скорости ветра и электрической нагрузки как значений случайного процесса и в момент времени t_1 реализуется их упреждение на следующие 10 минут. Параллельно выполняется контроль состояния оборудования (перераспределение, ремонт, простой по причине отсутствия рабочей ветровой энергии), определяющее тот или иной режим работы ветроэлектростанции. Если в момент времени t_1 по данным оценки скорости ветра рабочая ветровая энергия отсутствует, то производство электроэнергии потребителям Z_1 и Z_2 осуществляется со стороны накопительной системы электроэнергии (режим № 2) – по состоянию «перераспределение», либо режим № 2 остается неизменным, в зависимости от информации на этапе контроля режимов. Если в момент времени t_1 по данным оценки скорости ветра и электрической нагрузки

ветровая энергия рабочая и $P > \frac{P_{\max}}{2}$ (1), то реа-

лизация производства электроэнергии потребителям Z_1 и Z_2 осуществляется со стороны ветро-

генераторов G_n^1 и G_n^2 , в противном случае

$\left(P \leq \frac{P_{\max}}{2} \right)$ генерация электроэнергии потреби-

телям Z_1 и Z_2 обеспечивается со стороны какого-либо одного технологического процесса G_n^1 или

G_n^2 (режим № 1);

- на последующем этапе отрезок времени контроля состояния оборудования составляет $\Delta t_2 = 2$ мин, а процедура выбора режимов обеспечения электроэнергией потребителей аналогична описанной выше, при этом интервал времени измерения скорости ветра и электрической нагрузки остается неизменным и составляет $\Delta t = 60$ мин.

Таким образом, предложенный интервал времени выборки измеренных значений случайного процесса и алгоритм согласованной работы режимов обеспечения электроэнергией потребителей обеспечивает возможность интеграции предложенного метода повышения эффективности ветроэлектростанции на основе математического моделирования учета состояния процесса ветротурбины при распределении электроэнергии потребителям Арктики и Крайнего Севера в систему автоматического управления электротехнического комплекса. Обоснованный интервал упреждения

скорости ветра и электрической нагрузки $\Delta t_i = 12$ мин кратный одному часу, что делает возможным контролировать запланированный суточный объем производства электроэнергии объекту потребления в течение каждого часа.

Анализ полученных результатов

и выводы

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- установлено, что эффективность применения метода управления ветроэнергоустановкой на основе своевременной подготовки системы к внешним возмущающим воздействиям, учета вибрационной нагруженности привода и образования льда на лопастях ветроколеса при распределении электроэнергии в северных широтах, обусловлена уменьшением вероятности состояния отказа оборудования на 10 %;

- определен отрезок времени упреждения скорости ветра и электрической нагрузки, длительность которого обеспечивает получение устойчивых значений средней скорости ветра;

- предложен метод упреждения скорости ветра и электрической нагрузки, обеспечивающий минимальные отклонения от исходного процесса на всем интервале измерений;

- разработан критерий согласованной работы режимов обеспечения электроэнергией потребителей.

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 электро-снабжающей 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 энерго-стоимостного распределения и ее применение

в электрических сетях : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 189 с.

6. Богомолов Р. А. Создание СІМ-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. 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. Оценка показателей надежности ветроэлектрической установки на основе минимизации динамических нагрузок на элементы конструкции энергоагрегата // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, №3. С. 34–41. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-3-34-41.

18. Буяльский В. И. Программное обеспечение управления ветротурбиной в составе ветроэлектро-

станции на базе учета 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.

19. Буяльский В. И. Ветроэнергоустановки с оптимальным управлением в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 41–47. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-41-47.

20. Ляхтер В. М. Ветровые электростанции большой мощности. М.: Информэнерго, 1987. 72 с.

21. Денисенко Г. И., Васько П. Ф., Пекур П. П. Стохастическое моделирование параметров ветра для задач ветроэнергетики // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. 1990. №2. С. 109–114.

22. Буяльский В. И. Автоматизированная система управления ветроэнергетической установкой на базе прогнозирования скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии // Наука и мир. 2017. № 9 (49). С. 14–19.

23. Морские прогнозы / З. К. Абузаров и др. Л.: Гидрометиздат, 1988. 319 с.

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 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 georesursov*. 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 elektrotehnicheskimi kompleksami go-*

rodskoy 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.. *Optimizatsiya mezhsistemnykh peretokov vo vzaimodeystviyuschiy energoobyedineniyah* [Optimization of intersystem overflows in co-operating power associations]. *Energoberejenie – vajneyshee uslovie inovatsionnogo razvitiya APK: materialy Mejdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy 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 peredachey i raspredeleniem elektroenergii v adaptivnykh sistemakh 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. Nazarov M.H. *Optimizatsiya i planirovaniye rezhimov avtonomnoy energeticheskoy sistemi na osnove vozobnovlyayemykh i alternativnykh 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 elektrostanciey* [Working out of algorithm of a choice of operating modes of a complex of electrosupply with wind diese power plant]. *Zapiski gor-nogo instituta*. 2022, vol. 253, pp. 115-126 (in Russ.). DOI:10.31897/PMI.2022.7.

17. Buyalsky V.I. [Ocenka pokazateley nadoynosti vetroelektricheskoy ustanovki na osnove minimizatsii dinamicheskikh nagruzok na elementi konstruktsii energoagregata]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 34-41 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-3-34-41.

18. Buyalsky V.I. [Programnoe obespechenie upravleniya vetroturbiny v sostave vetroelektrostantsii na baze uchyota vibracionoy nagrujenosti privoda i svoevremennoy podgotovki procesa prinyatiya upravlyayushchih resheniy pri raznih rejimakh ekspluatatsii energoagregata]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023. vol. 21, no. 1, pp. 79-87. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-79-87.

19. Buyalsky V.I. [Vetroenergoustanovki s optimalnim upravleniem v usloviyah obrazovaniya lyda na lopastyah vetrokolesa v sostave vetroelektrostantsii]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024. vol. 22 no. 1, pp. 41-47. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-41-47.

20. Lyahter V.M. (1987) Vetrovie elektrostancii bol'shoy moshnosti [Wind power plant of the big capacity]. M.: Informenergo (in Russ.).

21. Denisenko G.I., Vasko P.F., Pekur P.P. [Stokhasticheskie modelirovanie parametrov vetra dlya zadach vetroenergetiki]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Energetika i transport*. 1990. No. 2, pp. 109-114.

22. Buyalsky V.I. [Avtomatizirovanaya sistema upravleniya vetroenergeticheskoy ustanovkoy na baze prognozirovaniya skorosti vetra i mochnosti potrebyaemoy elektroenergiy]. *International scientific magazine Science and world*. 2017, no. 9, pp. 14-19 (in Russ.).

23. Abuzyarov Z.K. (1988) Morskije prognozi [Sea forecasts]. L.: Gidrometizdat (in Russ.).

* * *

Operation Process Efficiency Improvement Based on Coordinated Operation Modes of Electric Power Supply for Consumers in the Arctic and the Far North Regions

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

The approach of effective technological process organization under wind turbine idle time due to its failure and subsequent maintenance is proved, provided by wind power plant control method based on timely system preparation for external disturbances (wind speed and electric loading), taking into account drive vibrating loading and ice formation on blades windwheel at different operation modes of the power unit that implies wind power plant operation in severe conditions of Arctic and the Far North regions and stipulated reduction of equipment failure probability by 10 %. Anticipation of wind speed and electric loading is based on the detailed analysis of the factors influencing electric power consumption in severe conditions of Arctic and the Far North regions. It is established, information on air stream dynamics should be accessible during small time intervals, and a 10-minute period should be accepted as an averaging interval providing steady values of average wind speed, and electric loading anticipating in synchronous comparison of the accepted criterion.

The method of wind speed and electric loading anticipation as stationary processes was proposed, implementing the approach of decomposition abreast polynomial of Chebishev, approximating a curve of process with high accuracy, to minimize deviations from initial process on within the whole measurement interval.

The sample time interval of the measured values for a random process and the algorithm of the coordinated operation modes is proved, contributing to the integration of the proposed method of wind power plant efficiency improvement on the basis of mathematical modeling of wind turbine operation condition under electric power distribution among the consumers in Arctic and the Far North regions, into electric and technical automatic control system.

Keywords: anticipation, wind turbine, electric power distribution, technological process, consumer, operating mode, time interval.

Получено: 09.10.24

Образец цитирования

Буяльский В. И. Повышение эффективности технологических процессов на основе критерия согласованной работы режимов обеспечения электроэнергией потребителей Арктики и Крайнего Севера // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 2. С. 66–73. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-66-73.

For Citation

Buyalsky V.I. [Operation Process Efficiency Improvement Based on Coordinated Operation Modes of Electric Power Supply for Consumers in the Arctic and the Far North Regions]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 66-73. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-66-73.