



# Elektr energetika tizimining talab etiladigan moslashuvchan quvvat zaxirasini baholash algoritmi

Denis Y. Losev

ERHB bosh mutaxassisi, Energetika Vazirligi huzuridagi "Milliy dispatcherlik markazi" DM, Toshkent, 100000, O'zbekiston; [d.losev@gubkin.uz](mailto:d.losev@gubkin.uz) <https://orcid.org/0009-0008-5712-9522>

**Dolzarbli:** qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushining oshishi, ularning quvvat ishlab chiqarishidagi yuqori o'zgaruvchanlik va oldindan aniqlash murakkabligi bilan tavsiflanganligi sababli elektr energetika tizimlarining ishonchligi va barqarorligini ta'minlash maqsadida yangi talablar ishlab chiqilishiga sabab bo'ladi. Shamol va quyosh elektr stansiyalarining quvvatidagi sezilarli tebranishlar quvvat balansining og'ish amplitudasi va chastotasining ortishiga olib keladi. Bu esa yuklama va generatsiyadagi o'zgarishlarga tezkor javob berishni ta'minlaydigan yetarli darajadagi moslashuvchan quvvat zaxirasini shakllantirish talab etadi. Mavjud quvvat zaxiralarini baholash usullari ko'pincha o'rtacha prognozlar yoki energetika tizimining statik xususiyatlariga tayanadi. Bu holat energiya balansini tuzilmasi murakkablashayotgan sharoitda moslashuvchanlikka bo'lgan ehtiyojni aniqlash aniqrogini pasaytiradi. Zamonaviy energiya tizimlarida tarmoqning dinamik xususiyatlarini, qayta tiklanuvchi energiya manbalari (QTEM)ning ehtimollik tavsifi bilan ishlashini hamda operativ-dispatcherlik boshqaruvi ma'lumotlarini hisobga oluvchi algoritmlarni ishlab chiqish zarurati yuzaga keladi. Talab etiladigan moslashuvchan quvvat zaxirasini baholash algoritmini yaratish elektr ta'minotining ishonchligini oshirish, ishlab chiqarish uskunalarning ish holatlarini optimallashtirish hamda ishlash xarajatlarini kamaytirish yo'lidagi muhim qadamdir. Bunday algoritmlarni ishlab chiqish, ayniqsa QTEMni faol joriy etayotgan va energetika infratuzilmasini modernizatsiya qilayotgan davlatlar uchun dolzarbdir. Shu sababli, taklif etilgan tadqiqot zamonaviy elektroenergetikaning eng muhim vazifalaridan birini hal etishga qaratilgan bo'lib, yuqori ilmiy va amaliy ahamiyatga ega.

**Maqsad:** fotoelektrik va shamol elektr stansiyalarining o'zgaruvchan ishlab chiqarish hamda elektr energiyasining sutkalik o'zgarishlarini hisobga olgan holda energiya tizimlarining talab etiladigan moslashuvchan quvvat zaxirasini baholash algoritmini ishlab chiqish.

**Usullari:** statistik tahlil va prognozlash usullaridan foydalaniladi.

**Natijalar:** qayta tiklanadigan energiya manbalarining o'zgaruvchan ishlab chiqarish va talab sharoitida elektroenergetika tizimining quvvat balansini ta'minlash uchun zarur bo'lgan soatlik moslashuvchan quvvat zaxiralarini miqdorlari aniqlangan.

**Kalit so'zlar:** elektroenergetika tizimi, quvvat zaxirasi, quvvat balansini, fotoelektrik stansiya, shamol elektr stansiyasi, qayta tiklanadigan energiya manbalari, hisoblash algoritmi.

## Алгоритм оценки требуемого резерва гибкой мощности электроэнергетической системы

Денис Ю. Лосев

Главный специалист ОРЭР ГУ «Национальный диспетчерский центр» при Министерстве Энергетики, Ташкент, 100000, Узбекистан; [d.losev@gubkin.uz](mailto:d.losev@gubkin.uz) <https://orcid.org/0009-0008-5712-9522>

**Актуальность:** рост доли возобновляемых источников энергии, характеризующихся высокой вариабельностью и низкой предсказуемостью выработки, предъявляет новые требования к обеспечению надежности и устойчивости электроэнергетических систем. Существенные колебания мощности ветровых и солнечных электростанций приводят к увеличению амплитуды и частоты отклонений баланса мощности, что требует наличия достаточного резерва гибкой мощности, обеспечивающего возможность быстрого реагирования на изменения нагрузки и генерации. Существующие методы оценки резервов мощности нередко опираются на усреднённые прогнозы либо статические характеристики энергосистемы, что снижает точность определения потребности в гибкости, а именно в условиях усложняющейся структуры энергобаланса. В современных энергосистемах возникает необходимость разработки алгоритмов, способных учитывать динамические свойства сети, вероятностный характер работы возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также интегрировать данные оперативно-диспетчерского управления. Создание алгоритма оценки требуемого резерва гибкой мощности является важным шагом к повышению надежности энергоснабжения, оптимизации режимов работы генерирующего оборудования и снижению эксплуатационных затрат. Разработка таких алгоритмов особенно актуальна для стран, активно внедряющих ВИЭ и модернизирующих свою энергетическую инфраструктуру. Поэтому предложенное исследование направлено на решение одной из ключевых задач современной электроэнергетики и обладает высокой научной и практической значимостью.

**Цель:** разработка алгоритма оценки требуемого резерва гибкой мощности энергосистемы с учётом переменной генерации фотоэлектрических (ФЭС) и ветроэлектрических (ВЭС) станций, а также суточных колебаний потребления электрической энергии.

**Методы:** использованы статистические методы анализа и прогнозирования.

**Результаты:** определены величины требуемых почасовых резервов гибкой мощности для обеспечения баланса мощностей электроэнергетической системы при наличии переменной генерации возобновляемых источников энергии и спроса.

**For citation:** Losev D.Y. Algorithm for estimating the required flexible capacity reserve of the power system.

Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 133-140.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20001613>

Received: 13.11.2025

Revised: 10.12.2025

Accepted: 15.02.2026

Published: 26.03.2026

**Copyright:** © Denis Y. Losev, 2026.

Development of an algorithm for estimating the required flexible capacity reserve of the power system.

Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open

access publication under the terms and

conditions of the Creative Commons

Attribution (CC BY) license ([https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

[https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

4.0/).



**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, резерв мощности, баланс мощностей, фотоэлектрическая станция, ветровая электростанция, возобновляемые источники энергии, алгоритм расчёта.

## Algorithm for estimating the required flexible capacity reserve of the power system

Denis Y. Losev

Lead Specialist of the Department of Power Flow Calculations, SI "National Dispatch Centre" under the Ministry of Energy, Tashkent, 100000, Uzbekistan; [d.losev@gubkin.uz](mailto:d.losev@gubkin.uz) <https://orcid.org/0009-0008-5712-9522>

**Relevance:** the increasing share of renewable energy sources, characterized by high variability and low predictability of their output, imposes new requirements on the reliability and stability of electric power systems. Significant power fluctuations of wind and solar power plants lead to an increase in the amplitude and frequency of deviations in the power balance, which necessitates the availability of sufficient flexible reserve capacity to enable rapid response to changes in load and generation. Existing methods for estimating reserve capacity often rely on averaged forecasts or static characteristics of the power system, which reduces the accuracy of determining flexibility needs under the increasingly complex structure of the energy balance. In modern power systems, there is a need to develop algorithms capable of accounting for the dynamic properties of the grid, the probabilistic nature of renewable energy operation, and integrating data from system operational dispatching. Developing an algorithm for determining the required flexible reserve capacity is an important step toward improving power supply reliability, optimizing the operating modes of generating equipment, and reducing operational costs. The development of such algorithms is particularly relevant for countries that are actively deploying renewable energy and modernizing their energy infrastructure. Therefore, the proposed study addresses one of the key challenges of modern electric power engineering and possesses high scientific and practical significance.

**Aim:** development of an algorithm for estimating the required flexible capacity reserve of power systems considering variable generation from photovoltaic and wind power plants, as well as daily fluctuations in electricity consumption.

**Methods:** there were used statistical methods of analysis and forecasting.

**Results:** the hourly required flexible capacity reserves necessary to maintain the power balance of the electric power system under variable generation from renewable energy sources and demand have been determined.

**Keywords:** electric power system, capacity reserve, power balance, photovoltaic power plant, wind power plant, renewable energy sources, calculation algorithm.

### 1. Введение (Introduction)

Современное развитие электроэнергетических систем характеризуется интенсивным ростом доли ВИЭ – солнечных и ветровых электростанций. Их широкое внедрение способствует снижению углеродного следа и повышению экологической устойчивости энергетики. Однако переменный характер выработки таких источников, а также изменчивость электропотребления создают серьёзные трудности для поддержания баланса мощности и обеспечения требуемого уровня надёжности электроснабжения.

Проблема расчёта требуемого резерва гибкой мощности в условиях высокой доли ВИЭ и динамически изменяющегося спроса становится одной из ключевых задач оперативно-диспетчерского управления [1]. Нестабильность генерируемой мощности ВИЭ, зависимость от погодных и климатических факторов, а также ограниченные возможности прогнозирования создают неопределённость, требующую применения новых подходов к определению резервов. Традиционные методы, основанные на усреднённых статистических данных, оказываются недостаточно точными при быстромменяющихся режимах работы энергосистемы.

Методологической основой исследования является системный анализ процессов балансирования мощности в энергосистемах с высокой долей переменной генерации. Для определения требуемого резерва гибкой мощности могут быть использованы методы, включающие в себя:

- **статистический анализ временных рядов**, позволяющий оценить амплитуду и частоту колебаний генерации ВИЭ и нагрузки;
- **методы вероятностного моделирования (Monte Carlo)** для учета неопределённости прогноза выработки ветровых и солнечных электростанций;
- **имитационное моделирование режимов энергосистемы** с использованием программных средств расчёта балансов мощности, что позволило исследовать динамическое поведение системы в различных сценариях;
- **оптимизационные методы**, применённые для определения минимально необходимого резерва гибкой мощности с учётом ограничений по быстродействию генерирующего оборудования;
- **алгоритмический синтез**, направленный на формирование вычислительной процедуры для автоматизированной оценки требуемого объёма резерва гибкой мощности.

В настоящее время в научной литературе предложен ряд подходов к оценке необходимого резерва мощности – вероятностные [12, 13], стохастические и оптимизационные методы обеспечения гибкости энергосистемы. Однако большинство из них не учитывает в полной мере временную корреляцию генерации ВИЭ, её пространственное распределение и взаимосвязь с динамикой потребления. Это снижает эффективность планирования режимов и может приводить к завышению или занижению объёмов резервов.

В статьях [8], [9] и [10] основное внимание уделяется методам определения эксплуатационных резервов для электроэнергетических систем с высокой долей ветровой генерации. Анализируются преимущества различных методов, включая анализ того, как задача определения эксплуатационных резервов может изменяться в исследованиях по интеграции ветровой энергии. В исследовании [11] предлагается метод, основанный на алгоритме внутренней точки, для оптимизации задачи динамического совместного распределения энергии и резервов с учетом практических сложных равенств и неравенств, таких как баланс мощности, ограничения по мощности генераторов и резервов, ограничения по темпам нарастания/снижения мощности и связь между резервом и энергией. В работе [12] используется подход оценки рисков, показывающий возможность описания последствия каждого возможного уровня резерва с помощью набора риск-индексов, полезных для принятия решений. В работе [14] рассматривается применение рыночных решений для управления гибкостью нарастания мощности при высокой доле возобновляемых источников. В работе [19] представлен комплексный обзор современных исследований в области гибкости энергосистем, включая существующие определения и методы количественной оценки, гибкие ресурсы, а также продукты и услуги, связанные с гибкостью, на рынках электроэнергии. В статье [20] рассматривается проверка данных об энергопотреблении в зданиях, которая включает выполнение процедур по обнаружению и замене нулевых, ошибочных, абсолютно одинаковых данных, а также восстановление утраченных данных об энергопотреблении.

В зарубежной практике обеспечение гибкости энергосистем при высокой доле ВИЭ рассматривается преимущественно с позиций рыночного регулирования. Так, в работе [2] Калифорнийского независимого системного оператора (CAISO) «Flexible Ramping Product – Draft Final Proposal (FMM-EIM, 2014)» предложен механизм формирования гибких резервов (Flexible Ramping Product, FRP), позволяющий экономически обоснованно распределять ресурсы для компенсации колебаний чистой нагрузки. Гибкость обеспечивается посредством рыночного механизма закупки восходящих и нисходящих резервов маневрирования (Up/Down Ramping Reserves), объём которых определяется на основе вероятностной оценки прогнозных отклонений генерации ВИЭ и потребления. Внедрение FRP позволило снизить количество случаев дефицита баланса мощности и повысить эффективность использования маневренных источников энергии.

В отличие от рыночного подхода CAISO, в настоящей работе предложен инженерно-аналитический метод расчёта требуемого резерва гибкой мощности, основанный на почасовом анализе прогнозных данных генерации ФЭС, ВЭС и графика электропотребления. Разработанный алгоритм не требует сложной рыночной инфраструктуры и ориентирован на применение в системах оперативно-диспетчерского планирования. Он позволяет определить почасовую динамику чистой нагрузки, выявить интервалы дефицита и избытка мощности, рассчитать восходящие и нисходящие резервы, а также оценить диапазон регулирования энергосистемы.

В основу алгоритма положен расчёт почасовой чистой мощности и его изменений, что обеспечивает возможность количественной оценки требуемого резерва для поддержания энергетического баланса в реальном времени.

Преимуществами алгоритма является:

- повышенная точность за счёт почасовой дискретизации;
- простота реализации в программных средах;
- применимость для краткосрочного планирования режимов, резервов и диспетчерского регулирования баланса мощностей;
- оптимизировать режим работы накопителей энергии в энергосистеме;
- выбрать оптимальное количество генераторов в энергосистеме, а также состав оборудования на электрических станциях, позволяющие снизить расходы топлива при включении или отключении оборудования в случаях дисбаланса;
- возможность адаптации к прогнозным данным, что делает алгоритм полезным для оперативного управления энергосистемой.

Недостаток данного алгоритма является использование прогнозных значений при вычислении чистой нагрузки ввиду наличия в них погрешности, что может привести к недооценке требуемого резерва.



Предложенный подход может быть использован при оперативном планировании режимов энергосистем, проектировании и оптимального использования систем хранения энергии, а также при разработке интеллектуальных систем управления балансом мощности в энергосистемах с высокой долей ВИЭ.

## 2. Методы и материалы (Methods and materials)

Методика расчёта предназначена для определения требуемого резерва гибкой мощности в электроэнергетических системах с переменной генерацией ВИЭ и изменяющимся графиком потребления активной мощности. Основное отличие предлагаемого подхода для расчёта регулируемого диапазона и определения резерва активной мощности заключается в том, что расчёт выполняется на основе прогнозных почасовых значений потребления мощности в энергосистеме и прогнозных значений генерации, предоставленных со стороны станций (ФЭС, ВЭС) при планировании режима работы на следующие сутки.

Методика расчёта заключается в выполнении следующих пунктов:

1) Для каждого часа суток  $i=1..24$  рассчитывается чистая нагрузка – мощность, которую должны покрыть управляемые электростанции (ТЭС, ГЭС, накопители энергии):

$$P_{\text{чист},i} = P_{\text{потр},i} - (P_{\text{ФЭС},i} + P_{\text{ВЭС},i}) \quad (1)$$

Изменение чистой нагрузки между соседними часами определяется как:

$$\Delta P_{\text{чист},i} = P_{\text{чист},i} - P_{\text{чист},i-1} \quad (2)$$

Параметр  $\Delta P_{\text{чист},i}$  характеризует значение мощности, необходимое для оценки необходимого резерва в целях регулирования на последующий час суток.

2) Определяется направление регулирования на следующий планируемый час суток.

В зависимости от знака изменения  $\Delta P_{\text{чист},i}$  выделяются 2 вида резерва мощности:

$$\begin{cases} R_i^{\uparrow} = \Delta P_{\text{чист},i}, & \text{если } \Delta P_{\text{чист},i} > 0, \\ R_i^{\downarrow} = -\Delta P_{\text{чист},i}, & \text{если } \Delta P_{\text{чист},i} < 0, \\ R_i^{\uparrow} = R_i^{\downarrow} = 0, & \text{если } \Delta P_{\text{чист},i} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Восходящий резерв  $R_i^{\uparrow}$  отражает необходимость увеличения генерации управляемых станций на последующий час суток для обеспечения баланса мощности, а нисходящий  $R_i^{\downarrow}$  – её снижения. Таким образом, эти значения показывают, насколько быстро регулируемая генерация должна измениться в течение часа, чтобы компенсировать динамику мощностей ВИЭ и спроса.

3) Определение максимальных резервов и диапазона регулирования энергосистемы. Максимальные требуемые восходящий и нисходящий резервы за час расчётных суток определяется как:

$$R_{\text{восх}}^{\max} = \max(R_i^{\uparrow}) \quad R_{\text{нисх}}^{\max} = \max(R_i^{\downarrow}), \quad (4)$$

а диапазон регулирования энергосистемы определяется как:

$$\Delta P_{\text{рег}} = P_{\text{чист},\max} - P_{\text{чист},\min}. \quad (5)$$

$P_{\text{чист},\min}$  – значение, которое эквивалентно генерации активной мощности традиционными электрическими станциями в базовом режиме.

4) Алгоритм расчёта исследования включает следующие процедуры:

Шаг 1. Ввод исходные данные  $P_{\text{потр},i}, P_{\text{ФЭС},i}, P_{\text{ВЭС},i}$  для каждого часа.

Шаг 2. Расчёт чистой нагрузки по формуле (1).

Шаг 3. Определение почасовых изменений по формуле (2).

Шаг 4. Разделение результатов на восходящие и нисходящие изменения по (3).

Шаг 5. Поиск максимальных значений резервов по (4).

Шаг 6. Построение графика регулируемой мощности.

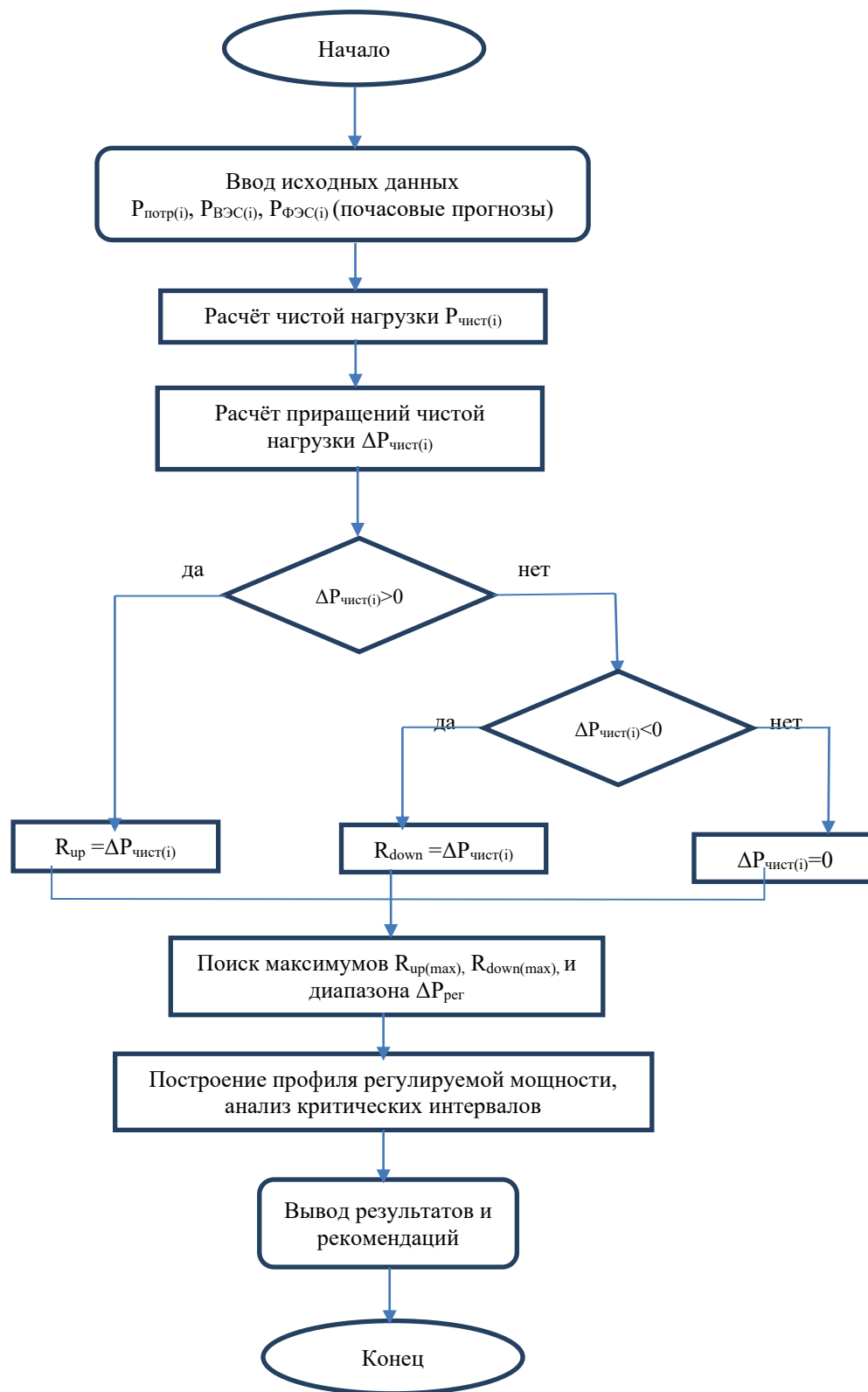
Шаг 7. Анализ результатов и определение требуемого резерва для надёжного регулирования баланса мощности.

В качестве исходной информации использовались:

- прогнозные почасовые значения выработки мощности ФЭС и ВЭС, выданные диспетчерскому центру станциями на сутки вперёд;

- прогнозные почасовые значения потребления мощности в энергосистеме, сформированное на основе анализа статистических данных и погодных факторов.

Все данные формируются с временным шагом  $\Delta t = 1$  час на период планирования 24 часа, что соответствует стандартной практике суточного оперативного планирования режима электроэнергетической системы (ЭЭС).



**Рис. 1.** Блок-схема алгоритма оценки резерва гибкой мощности  
**Figure 1.** Flowchart of the flexible capacity reserve estimation algorithm



**Таблица 1.** Исходные информация, предназначенные для расчётов  
**Table 1.** Initial data for calculations

Часы суток	1	2	3	4	5	6	7	8
Мощность ВЭС, МВт	1133	1040	964	928	933	940	891	857
Мощность ФЭС, МВт	0	0	0	0	0	0	119	894
Мощн. потр ЭС, МВт	7800	7400	7200	7100	7200	7400	7600	8200
Часы суток	9	10	11	12	13	14	15	16
Мощность ВЭС, МВт	473	388	301	259	223	201	192	193
Мощность ФЭС, МВт	1753	2032	2106	2066	2048	2028	1993	1918
Мощн. потр ЭС, МВт	8600	9100	9300	9200	8900	9000	9300	9400
Часы суток	17	18	19	20	21	22	23	24
Мощность ВЭС, МВт	204	218	378	465	551	628	697	714
Мощность ФЭС, МВт	1611	967	222	0	0	0	0	0
Мощн. потр ЭС, МВт	9700	9900	9900	10100	9900	9500	9000	8200

Структура исходных данных включает почасовые прогнозные значения выработки активной мощности всех ФЭС, ВЭС и потребления электроэнергетической системы на планируемую сутки. Исходные данные прогноза генерации активной мощности ФЭС, ВЭС и потребления за 24-час текущий сутки составляют:  $P_{ФЭС}=0$ МВт,  $P_{ВЭС}=1182$ МВт,  $P_{потр}=8400$ МВт.

### 3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В соответствии с алгоритмом (шаг 2-5), произведён расчёт требуемого резерва мощности на основе почасовых прогнозных данных выработки фотоэлектрических (ФЭС) и ветроэлектрических (ВЭС) станций, а также графика электропотребления энергосистемы. Результаты расчётов представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчёта, МВт  
**Table 2.** Calculation results, MW

Час сутки	ФЭС	ВЭС	Спрос	$P_{чист,i}$	$\Delta P_{чист,i}$	$R_i^{\uparrow}$	$R_i^{\downarrow}$
0	0	1182	8400	7218	-		
1	0	1133	7800	6667	-551	0	-551
2	0	1040	7400	6360	-307	0	-307
3	0	964	7200	6236	-124	0	-124
4	0	928	7100	6172	-64	0	-64
5	0	933	7200	6267	95	95	0
6	0	940	7400	6460	193	193	0
7	119	891	7600	6590	130	130	0
8	894	857	8200	6449	-141	0	-141
9	1753	473	8600	6374	-75	0	-75
10	2032	388	9100	6680	306	306	0
11	2106	301	9300	6893	213	213	0
12	2066	259	9200	6875	-18	0	-18
13	2048	223	8900	6629	-246	0	-246
14	2028	201	9000	6771	142	142	0
15	1993	192	9300	7115	344	344	0
16	1918	193	9400	7289	174	174	0
17	1611	204	9700	7885	596	596	0
18	967	218	9900	8715	830	830	0
19	222	378	9900	9300	585	585	0
20	0	465	10100	9635	335	335	0
21	0	551	9900	9349	-286	0	-286
22	0	628	9500	8872	-477	0	-477
23	0	697	9000	8303	-569	0	-569
24	0	714	8200	7486	-817	0	-817
<b>Итого, МВт·ч</b>	<b>19757</b>	<b>13771</b>	<b>208900</b>	<b>3463</b>	-		

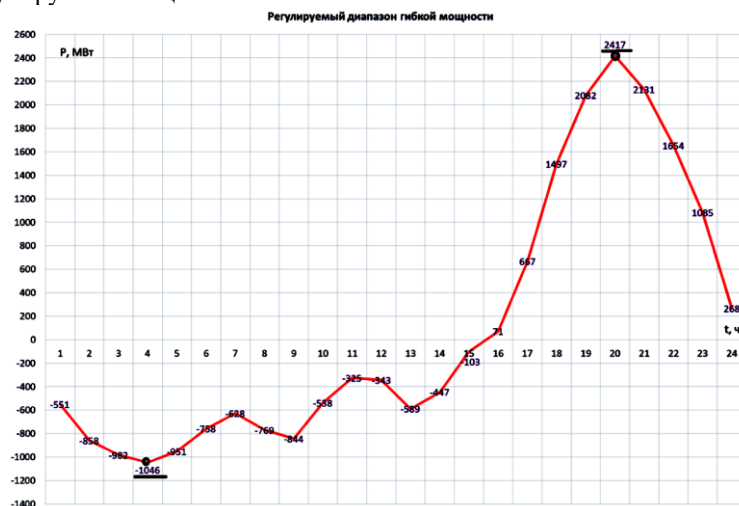
На основе исходных прогнозных данных определены значения чистой нагрузки (мощности, требуемой от управляемых станций) по каждому часу суток, а также изменения её величины между соседними интервалами времени, характеризующие требуемый объём регулирующей мощности. В результате вычислений установлено, что в течение суток значения чистой нагруз-

ки изменяются в диапазоне от 6172 МВт до 9635 МВт, а общий диапазон регулирования энергосистемы составляет  $\Delta P_{\text{рег}} = 3463$  МВт.

Максимальная потребность во восходящем резерве мощности наблюдается в вечерние часы, преимущественно в интервале 14–20 часов. В 18-м часе значение восходящего резерва составил 830 МВт. Данный период характеризуется резким снижением генерации фотоэлектрических станций при одновременном росте электропотребления, что приводит к увеличению чистой нагрузки и росту потребности в регулирующих мощностях.

Наибольшие значения нисходящего резерва мощности наблюдаются в дневные часы, в особенности при пиковых значениях генерации солнечных станций и снижении спроса. Максимальная величина нисходящего резерва составила 551 МВт, что соответствует часовым интервалам 0–1 часов, в период часов ночного минимума.

На основании прогнозируемой характеристики чистой нагрузки получена характеристика изменения регулируемой мощности.



**Рис. 2.** Характеристика регулируемого диапазона гибкой мощности энергосистемы  
**Figure 2.** Characteristics of the regulating range of the power system's flexible capacity

Также согласно рис.2 можно увидеть, что при изменении генерации ВИЭ и потребления энергосистемы в течение суток регулируемый диапазон составляет 3463 МВт.

#### 4. Заключение (Conclusion)

В работе проведён анализ формирования и оценки резерва гибкой мощности энергосистемы с учётом переменной генерации ФЭС и ВЭС, а также суточных колебаний электропотребления.

Разработана математическая модель почасового баланса мощности, отражающая взаимодействие между прогнозными значениями генерации ФЭС, ВЭС и потреблением электроэнергии. Модель позволяет определять почасовые значения чистой нагрузки энергосистемы и оценивать отклонения мощности в течение суток, что является основой для расчёта регулирующих резервов.

Предложен алгоритм расчёта требуемого резерва гибкой мощности. Алгоритм основан на анализе изменений суммарной мощности возобновляемых источников и спроса, с разделением приращений на восходящий и нисходящий резервы.

- В отличие от существующих методов планирования резервов, предложенный алгоритм:
- учитывает почасовые колебания генерации ВИЭ и динамику спроса активной мощности, что повышает точность расчёта требуемого резерва;
  - позволяет количественно оценивать регулирующую мощность в каждый час суток, определяя интервалы дефицита и избытка энергии;
  - использует интегральную модель энергетического баланса, связывающую ФЭС, ВЭС и потребление в единую систему, что обеспечивает адаптацию алгоритма к различным типам энергосистем;
  - предоставляет возможность оптимального распределения резерва между традиционными источниками и системами накопления энергии в зависимости от требуемого уровня регулирования.

На основе исходных прогнозных данных, включающих почасовые значения генерации и спроса, определены значения чистой нагрузки и её изменения между соседними часами, что позволило рассчитать требуемый объём восходящего и нисходящего резерва мощности.

На основе реальных почасовых данных генерации и потребления, а также с применением



разработанного алгоритма выполнен расчёт регулируемой мощности и получена характеристика регулируемого диапазона гибкой мощности энергосистемы в условиях наличия ВИЭ. Получено, что чистая нагрузка энергосистемы изменяется в пределах от 6172 МВт до 9635 МВт, а диапазон регулирования составляет 3463 МВт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития. /Под общей редакцией академика Салимова А.У. –Т.: «Фан ва технологиялар нашриёт матбаа-уйи», 2021. -952 с.
2. California Independent System Operator. Draft Final Proposal - Flexible Ramping Products (including Fifteen-Minute Market and Energy Imbalance Market). December 4, 2014.
3. Ela, E., Kirby, B., Lannoye, E., et al: ' Evolution of operating reserve determination in wind power integration studies'. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, MN, 2010, pp. 1–8.
4. Ibanez, E., Krad, I., Ela, E.: 'A systematic comparison of operating reserve methodologies'. 2014 IEEE Power and Energy Society General Meeting, National Harbor, MD, 2014, pp. 1–5.
5. De Vos, K., Driesen, J.: 'Dynamic operating reserve strategies for wind power integration', IET Renew. Power Gener., 2014, 8, (6), pp. 598–610.
6. Shrivastava, A.B., Pandit, M., Dubey, H.M.: ' Dynamic energy and reserve dispatch solutions for electricity market with practical constraints: intelligent computing technique'. Fourth Int. Conf. on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2014, 7–9 April 2014, pp. 990–994.
7. Matos, M.A., Bessa, R.J.: 'Setting the operating reserve using probabilistic wind power forecasts', IEEE Trans. Power Syst., 2011, 26, (2), pp. 594–603.
8. Muzhikyan, A., Farid, A.M., Youcef-Toumi, K.: ' An enhanced method for the determination of the ramping reserves'. American Control Conf. (ACC), 2015, pp. 994–1001.
9. Navid, N., Rosenwald, G.: 'Market solutions for managing ramp flexibility with high penetration of renewable resource', IEEE Trans. Sustain. Energy, 2012, 3, (4), pp. 784–790.
10. Mohammad Behzad Hadi, Moein Moeini-Aghaie, Mohammad Khoshjahan, Payman Dehghanian. A Comprehensive Review on Power System Flexibility: Concept, Services, and Products. January 2022. IEEE Access PP(99):1-1. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3206428.
11. Muzaffar Khudayarov, Sarvar Qurbonov. Data verification for forecasting of building energy consumption. ICECAE 2023. E3S Web of Conferences 434, 01003 (2023), [doi.org/10.1051/e3sconf/202343401003](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401003).

## REFERENCES

1. Allaev K.R. Modern Energy and Prospects for Its Development. Edited by Academician Salimov A.U. -Tashkent: "Fan va texnologiyalar nashriyot matbaa-uyi", 2021. 952 p. (In Russ).
2. California Independent System Operator. Draft Final Proposal - Flexible Ramping Products (including Fifteen-Minute Market and Energy Imbalance Market). December 4, 2014.
3. Ela, E., Kirby, B., Lannoye, E., et al: ' Evolution of operating reserve determination in wind power integration studies'. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, MN, 2010, pp. 1–8.
4. Ibanez, E., Krad, I., Ela, E.: ' A systematic comparison of operating reserve methodologies'. 2014 IEEE Power and Energy Society General Meeting, National Harbor, MD, 2014, pp. 1–5.
5. De Vos, K., Driesen, J.: 'Dynamic operating reserve strategies for wind power integration', IET Renew. Power Gener., 2014, 8, (6), pp. 598–610.
6. Shrivastava, A.B., Pandit, M., Dubey, H.M.: 'Dynamic energy and reserve dispatch solutions for electricity market with practical constraints: intelligent computing technique'. Fourth Int. Conf. on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2014, 7–9 April 2014, pp. 990–994.
7. Matos, M.A., Bessa, R.J.: 'Setting the operating reserve using probabilistic wind power forecasts', IEEE Trans. Power Syst., 2011, 26, (2), pp. 594–603.
8. Muzhikyan, A., Farid, A.M., Youcef-Toumi, K.: ' An enhanced method for the determination of the ramping reserves'. American Control Conf. (ACC), 2015, pp. 994–1001.
9. Navid, N., Rosenwald, G.: 'Market solutions for managing ramp flexibility with high penetration of renewable resource', IEEE Trans. Sustain. Energy, 2012, 3, (4), pp. 784–790.
10. Mohammad Behzad Hadi, Moein Moeini-Aghaie, Mohammad Khoshjahan, Payman Dehghanian. A Comprehensive Review on Power System Flexibility: Concept, Services, and Products. January 2022. IEEE Access PP(99):1-1. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3206428.
11. Muzaffar Khudayarov, Sarvar Qurbonov. Data verification for forecasting of building energy consumption. ICECAE 2023. E3S Web of Conferences 434, 01003 (2023), [doi.org/10.1051/e3sconf/202343401003](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401003).