



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.4

## ВВЕДЕНИЕ АДАПТИВНОГО ОКНА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКА БАЗОВОЙ НАГРУЗКИ В РАСЧЕТАХ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОБЪЕМА СНИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

**Ворожейкин Д.А.**

*ФГБОУ ВО «МИРЭА - РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Москва, Россия (119454, г. Москва, Пр-т Вернадского, д. 78, стр.4), e-mail: danilvda@gmail.com*

В данной работе рассматривается задача повышения качества прогнозирования электропотребления при определении объемов снижения потребления в условиях событий по управлению спросом с использованием адаптивного окна графика базовой нагрузки (ГБН). Исследование показывает, что оптимальный размер окна варьируется в зависимости от отрасли, а его адаптивный выбор снижает ошибку прогнозирования. Для оценки эффективности подхода использовались метрики MAPE и статистические методы. Разработаны рекомендации по интеграции предложенного метода в существующие информационные системы.

Ключевые слова: Управление спросом, прогнозирование потребления, ГБН, адаптивное окно, асинхронные вычисления, микросервисная архитектура.

## INTRODUCING OF AN ADAPTIVE WINDOW FOR BUILDING THE BASE LOAD SCHEDULE IN CALCULATIONS TO DETERMINE THE AMOUNT OF POWER CONSUMPTION REDUCTION

**Vorozheikin D.A.**

*MIREA - RUSSIAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, Moscow, Russia (119454, Moscow, avenue. Vernadsky, 78, b. 4), e-mail: danilvda@gmail.com*

This paper considers the problem of improving the quality of electricity consumption forecasting in determining the amount of consumption reduction under demand management events using an adaptive baseload schedule window. The study shows that the optimal window size varies from industry to industry and its adaptive selection reduces the forecasting error. MAPE metrics and statistical methods were used to evaluate the performance of the approach. Recommendations for integrating the proposed method into existing information systems were developed.

Keywords: Demand response, consumption forecasting, consumption baseline, adaptive window, asynchronous computing, microservice architecture.

### Введение

В последние годы управление спросом на электроэнергию стало важным инструментом для повышения стабильности и эффективности энергосистем. Этот механизм обеспечивает баланс между производством и потреблением электроэнергии, стимулируя конечных потребителей временно снижать свою активность, к примеру останавливать производство основной продукции, в обмен на оплату оказанных услуг. Снижение потребления в периоды высоких оптовых цен или при перегрузке энергосистемы помогает избежать пиковых нагрузок и минимизировать затраты на производство электроэнергии [1].

Целью исследования является разработка и внедрение подхода с адаптивным окном ГБН для повышения точности прогнозирования объема снижения потребления электроэнергии при определении объема снижения потребления в рамках событий управления спросом.

### Определение объема снижения потребления

Одной из задач, решаемой в деловом процессе управления спросом, является определение объема снижения потребления электроэнергии в заданные часы. В классическом подходе для определения объема снижения выполняется сравнение фактической нагрузки энергопринимающего устройства с плановой нагрузкой, которая имела бы место при отсутствии рассматриваемого снижения [2]. Это позволяет вычислить разницу и определить объем разгрузки. Пример сравнения фактического и планового потребления энергии представлен на Рисунке 1.

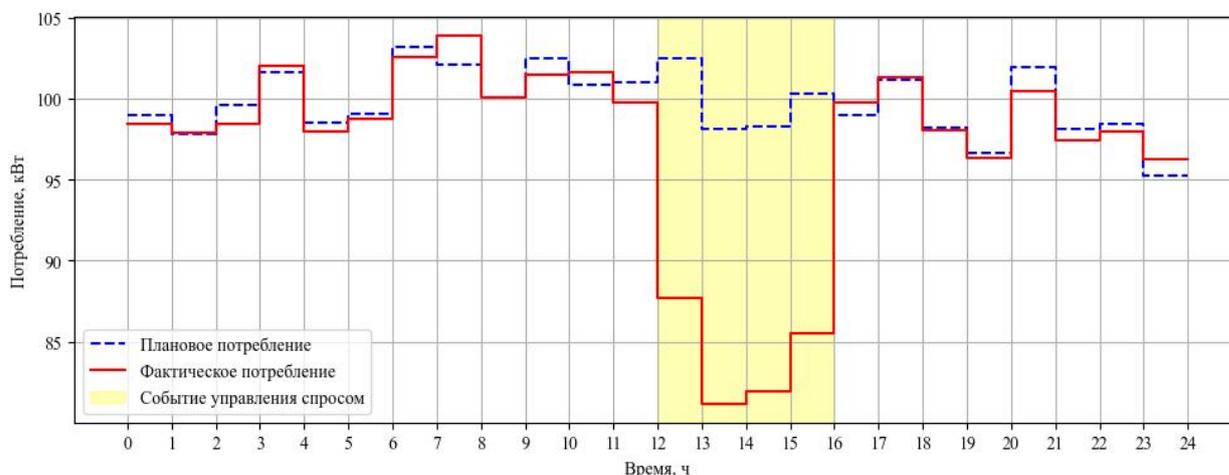


Рисунок 1 – Сравнение фактического и планового потребления энергии

Среди классических подходов можно выделить:

- график базовой нагрузки (ГБН),
- заявленный график нагрузки (ЗГН),
- максимальная базовая нагрузка (МБН).

Метод ГБН основывается на данных потребления за последние рабочие дни за исключением дней, которые не могут попасть в окно. Расчет ГБН осуществляется на основе средних значений потребления для каждого часа. Формула для расчета ГБН выглядит следующим образом:

$$\text{ГБН}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(t)$$

где:

- N – количество дней,
- $P_i(t)$  – потребление в час t на i-ый день.

ЗГН формируется самим потребителем и основывается на его предположениях о будущем электропотреблении в определенные периоды времени.

МБН используется для прогнозирования на основе наиболее высоких значений потребления за прошлые периоды.

Минусы этих подходов:

- ГБН может демонстрировать недостаточную адаптивность при использовании фиксированных параметров в расчёте, таких как размер окна, поскольку одинаковый подход для всех потребителей не учитывает индивидуальные особенности их характера потребления, что снижает точность прогнозов,
- ЗГН зависит от субъективной оценки потребителя и требует введения дополнительных проверок незавышения графика в дни событий,
- МБН также требует введение дополнительных проверок.

Основным методом является ГБН из-за его простоты, понятности и устойчивости к манипулированию [2]. Опираясь на международный опыт, в качестве размера окна для расчётов ГБН обычно используют 10 дней [3].

Визуализация примера расчёта ГБН представлена на Рисунке 2.

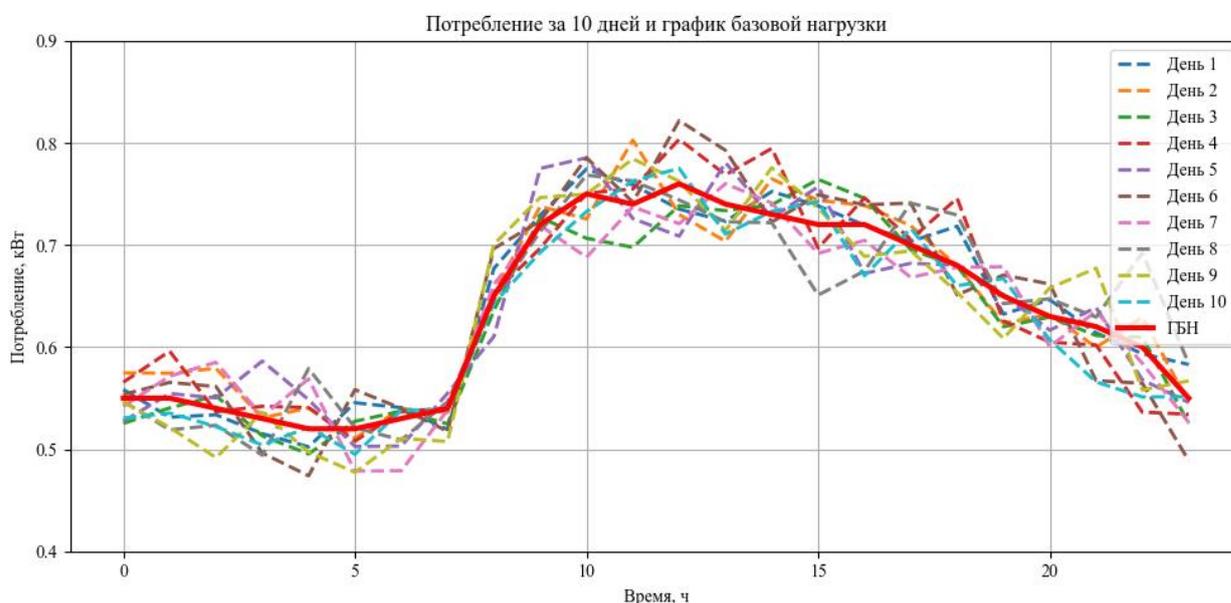


Рисунок 2 – Визуализация расчёта ГБН за 10 дней

### Метрика проверки качества

Одной из ключевых метрик для оценки качества прогнозов является MAPE (Mean Absolute Percentage Error) – средняя абсолютная процентная ошибка. Этот показатель широко применяется благодаря своей простоте и наглядности, поскольку он количественно отражает степень отклонения фактических значений потребления от прогнозных.

### Адаптивное окно и экспериментальная проверка

С момента запуска делового процесса по управлению спросом в России накопилось достаточное количество данных о электропотреблении, что позволяет провести анализ и определить, является ли стандартный размер окна в 10 дней действительно оптимальным.

Процесс поиска оптимального размера окна можно сформулировать как задачу минимизации ошибки MAPE, выраженную следующей формулой:

$$w_{opt} = \arg \min_{w \in W} MAPE(w)$$

где:

- $W$  – набор возможных размеров окна,
- $MARE(w)$  – средняя абсолютная процентная ошибка для размера окна  $w$ .

Был проведён расчёт окон ГБН для всех энергопринимающих объектов с различным размером окна от 2 до 20 дней, с последующей оценкой метрики  $MARE$ . В качестве исходных данных использовались условные среднестатистические данные потребления за один месяц. Результаты расчётов представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта  $MARE$  для окон разных размеров

Размер окна	$MARE$
2	100.30
3	99.89
4	100.27
5	100.92
6	101.06
7	99.05
8	98.04
9	96.54
10	97.19
11	97.69
12	97.98
13	98.32
14	98.50
15	98.84
16	99.15
17	99.47
18	99.53
19	99.70
20	99.80

Результаты показали, что оптимальный размер окна отличается от значения 10 дней и равен 9 дням с разницей  $MARE$  на 0,65.

Несмотря на то, что найденное значение может быть оптимальным в среднем для всех объектов, для конкретной отрасли может существовать своё собственное оптимальное значение размера окна. Это может быть связано с характером потребления энергии, зависящими от типа производства.

Учитывая данные особенности, был проведён расчёт оптимального размера окна для каждой отрасли в отдельности. Результаты данного расчёта представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчётов метрик для окон разных размеров

Отрасль	Оптимальный размер окна	MAPE при оптимальном размере окна	MAPE при размере окна 10	p-value
Водоснабжение и водоотведение	6	8.87	9.13	0.40
Горнодобывающая промышленность	7	127.00	142.20	0.01
Дата-центры	9	301.24	302.23	0.90
Добыча нефти и газа	18	16.13	17.50	0.03
Котельные и электроотопление	18	29.11	30.40	0.05
Металлургия	18	20.68	21.08	0.62
Пищевая промышленность	18	12.42	13.83	0.06
Производство цемента, асфальта, кирпичей	11	15.08	15.12	0.99
Базовые станции сотовой связи	12	3.61	3.83	0.01
Спортивные сооружения	20	40.62	43.73	0.03
Торгово-развлекательные центры	6	47.08	47.51	0.09
Транспортировка нефти и газа	4	21.29	22.20	0.70
Химическое производство	12	13.27	13.45	0.59
Целлюлозно-бумажная промышленность	20	32.75	33.88	0.03

Полученные результаты показали, что каждая отрасль может иметь своё собственное оптимальное значение размера окна. Для проверки и подтверждения эффективности данного подхода был проведен анализ полученных результатов, в ходе которого окна оптимального размера сравнивались со стандартными окнами размером 10 дней. Чтобы обосновать выявленные улучшения, использовались такие методы, как критерий Уилкоксона, парный t-тест, а также оценка p-value, результаты которых представлены в Таблице 2.

Критерий Уилкоксона применялся в случаях, когда данные не соответствовали нормальному распределению, парный t-тест – когда распределение данных было близко к нормальному.

P-value также рассчитывался для каждого теста, что позволяло определить значимость различий. Если значение p-value оказывалось ниже 0,05, разница считалась статистически значимой, что указывало на то, что использование оптимального окна действительно улучшает точность прогноза [4].

Практическая значимость различий оценивалась отдельно, чтобы определить их реальное влияние на качество прогноза. Например, снижение значения MAPE на более чем

5% рассматривалось как значительное достижение, которое заметно повышает точность расчёта объёмов потребления.

Статистически значимые улучшения наблюдаются в следующих отраслях:

- горнодобывающая промышленность,
- добыча нефти и газа,
- базовые станции сотовой связи,
- спортивные сооружения,
- целлюлозно-бумажная промышленность.

Оценка практической значимости отражена в Таблице 3.

Таблица 3 – Отрасли с практической значимостью

Отрасль	Процент снижения ошибки
Горнодобывающая промышленность	10.70
Добыча нефти и газа	7.83
Пищевая промышленность	10.20
Базовые станции сотовой связи	5.74
Спортивные сооружения	7.12

В большинстве остальных отраслей разница в MAPE не является статистически значимой, а снижение ошибки не превышает 4%.

### Проверка сезонности

Вопрос о наличии сезонных изменений в оптимальном размере окна является важным для точного прогнозирования потребления. Сезонные колебания и изменения в модели потребления могут существенно влиять на выбор подходящего интервала для усреднения данных. Чтобы определить, существует ли связь между временем и оптимальным размером окна, был проведён анализ данных по месяцам.

В качестве примера была рассмотрена отрасль «Горнодобывающая промышленность», для которого определены оптимальные размеры окна в нескольких месяцах. Результаты исследования представлены в Таблице 4.

Таблица 4 – Оптимальный размера окна для одной отрасли по месяцам

Месяц	Оптимальный размер окна	MAPE при оптимальном размере окна	MAPE при размере окна 10	Процент улучшения
Май	5	19.53	20.53	4.87
Июнь	6	28.04	29.39	4.60
Июль	15	224.91	240.72	6.57
Август	7	127.00	142.20	10.69
Сентября	12	8.12	8.36	2.87
Октябрь	5	38.04	40.22	5.42
Ноябрь	6	33.18	34.20	2.98

Данные из таблицы показывают, что размер окна существенно изменяется в зависимости от месяца. В результате, для поддержания высокой точности прогнозирования необходимо периодически пересчитывать оптимальный размер окна для каждой отрасли.

### Реализация

Так как данный расчёт является ресурсоёмкой задачей, его выполнение может значительно нагружать основную систему и замедлить её работу. Поэтому целесообразно вынести вычисления в отдельный микросервис, который будет производить расчёты и периодически обновлять оптимальный размер окна для каждой отрасли. Чтобы эффективно управлять процессом обновления и интеграцией результатов, можно использовать брокер сообщений, к примеру, RabbitMQ [5]. Это позволит запускать процесс расчёта по запросу или в заданное время, а также получать результаты асинхронно, без нагрузки на основную информационную систему.

Пример взаимодействия информационной системы управления спросом на электроэнергию с сервисом расчётом представлен на Рисунке 3.

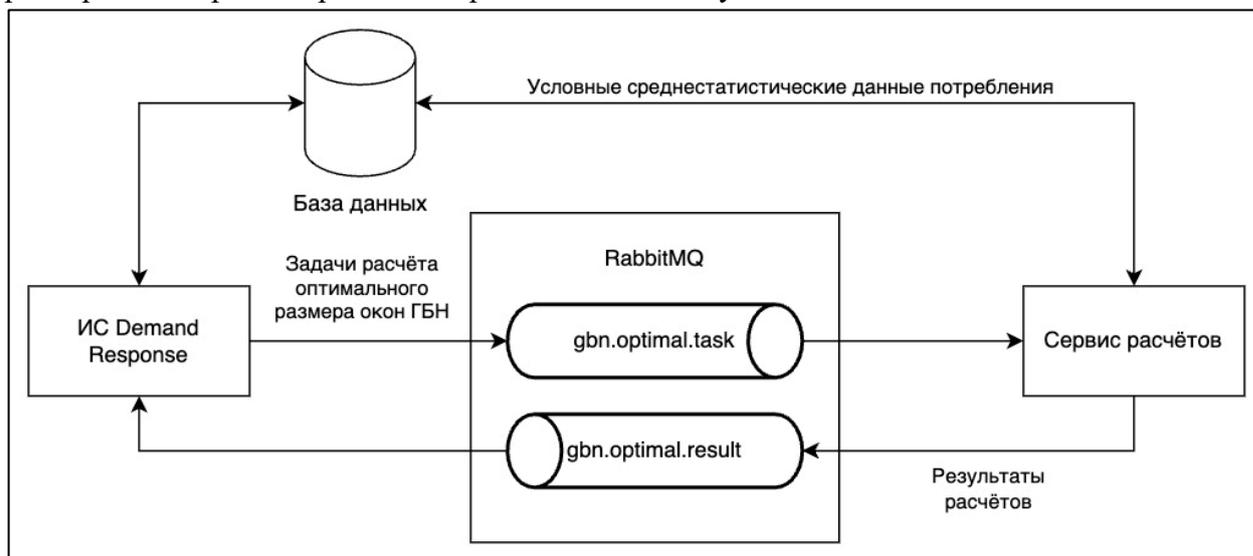


Рисунок 3 – Пример взаимодействия основной системы с сервисом расчётов

### Заключение

Проведённое исследование показало, что использование адаптивного окна графика базовой нагрузки (ГБН) повышает точность прогнозирования электропотребления при определении объёмов снижения потребления в рамках событий управления спросом. Установлено, что оптимальный размер окна варьируется в зависимости от отрасли и изменяется со временем под влиянием сезонных и отраслевых факторов, что требует его регулярного пересчёта. Внедрение адаптивного подхода позволило снизить среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE) на 2–10% в ряде отраслей, подтверждая практическую значимость метода. Для автоматизации расчётов оптимального размера окна предложено использовать вычислительный микросервис с применением брокера сообщений. Таким образом, адаптивное окно ГБН демонстрирует высокую эффективность, улучшая точность прогнозирования с учётом отраслевых особенностей и динамики потребления.

### Список литературы

1. Дзюба А.П., Соловьева И.А. Управление спросом на электропотребление в России // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. №1. С. 72-79. URL: <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-1-72-79>.
2. Поддубный А.А., Акимов Д.А., Юдина К.В., Николаев А.В. Анализ основных методов построения графика базовой нагрузки при управлении спросом // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. №1 (64). С. 64-69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44765514>.
3. The Demand Response Baseline // EnerNoc. 2011. URL: [https://www.naesb.org/pdf4/dsmee\\_group3\\_100809w3.pdf](https://www.naesb.org/pdf4/dsmee_group3_100809w3.pdf).
4. Мусллов С.А., Зайцева Н.В., Чистяков М.В. Почему 0,05? // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации. 2023. С. 436-440. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54102680>.
5. Тришин Е.А. Исследование брокеров сообщений в приложениях с микро-сервисной архитектурой // Вестник науки. 2024. №6 (75). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-brokerov-soobscheniy-v-prilozheniyah-s-mikro-servisnoy-arhitekturoy>.

### References

1. Dzyuba A.P., Soloveva L.A. Electrical energy demand management in Russia // Strategic decisions and risk management. 2018. No. 1. P. 72-79. URL: <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-1-72-79>.
  2. Poddubniy A.A., Akimov D.A., Yudina K.V., Nikolaev A.V. Analysis of main methods of plotting the basic load curve under demand control // Electricity. Transmission and distribution. 2021. No. 1 (64). P. 64-69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44765514>.
  3. The Demand Response Baseline // EnerNoc. 2011. URL: [https://www.naesb.org/pdf4/dsmee\\_group3\\_100809w3.pdf](https://www.naesb.org/pdf4/dsmee_group3_100809w3.pdf).
  4. Muslov S.A., Zaitseva N.V., Chistyakov M.V. Why 0.05? // Modern trends in the development of science and the world community in the era of digitalisation. 2023. P. 436-440. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54102680>.
  5. Trishin E.A. Research of message brokers in applications with microservice architecture // Vestnik nauki. 2024. №6 (75). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-brokerov-soobscheniy-v-prilozheniyah-s-mikro-servisnoy-arhitekturoy>.
-