

Рис.1. Результаты прогнозирования отключения проветривания в час сетевой мощности в рамках работы предприятия по 3 ценовой категории

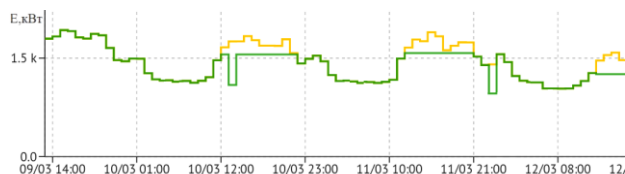


Рис.2. Результаты прогнозирования отключения проветривания в часы сетевой и электрической мощности в рамках работы предприятия по 4 ценовой категории

#### Заключение

Имея сформированный прогноз нагрузки с отображением результата участия в сценариях управления энергопотреблением, компания может корректировать график работы персонала или оборудования, заранее определять экономический эффект от реализации снижения мощности, заранее обеспечивать безопасные условия отключений, планировать использование накопителей энергии.

Представленные результаты экспериментальных исследований позволяют создавать и исполнять такие прогнозные техники, которые будут показывать более высокую точность для конкретного объекта или в определенных условиях, включая внешние факторы и имеющиеся вычислительные мощности.

Представленная система управления энергопотреблением является частью киберфизической системы и востребована в интеллектуальных зданиях и на промышленных предприятиях, так как реализует предиктивное управление мощностью, [8]. Решение может быть использовано при управлении проветриванием подземных горнодобывающих предприятиях, а также при оценке возможности участия в событиях управления спросом на электроэнергию.

#### Список литературы:

1. Faizrahmanov R.A., Frank T., Kychkin A.V., Fedorov A.B. Sustainable energy consumption control using the MYJEVIS energy management data system // Russian Electrical Engineering. No. 82 (11). pp. 607-611. 2011.
2. Gubbi J. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future generation computer systems. – 2013. – Vol. 29. – №. 7. – pp. 1645-1660.
3. Кычкин А.В., Микрюков Г. П. Метод обработки результатов мониторинга группы энергопотребителей // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 6. С. 9-14.
4. Кувайскова Ю.Е., Алёшина А.А. Программный комплекс моделирования и прогнозирования системы временных рядов // Вестник ульяновского государственного технического университета 2013. №2. С.24-27
5. Каракулов И.В., Ключев А.В., Столбов В.Ю. Прогнозирование технического состояния электроцентробежного насоса на основе нейросетевого моделирования // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлек-

троники 2020 №4 С. 37-46

6. Беглов Р.Р., Воронов К.Н., Гнатюк Б.А. Нейросетевая система почасового прогнозирования потребления электроэнергии "На сутки вперед", инвариантная к графикам нагрузки // Сборник статей Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне: в 2 томах. под ред. М.А. Щербакова. 2015, С. 8-10

7. Кычкин А.В., Дерябин А.И., Викентьева О.Л., Шестакова Л.В. Архитектура сетевого управляющего комплекса здания на базе IoT-устройств // Датчики и системы. 2018. № 5 (225). С. 32-38.

8. Викентьева О.Л., Дерябин А.И., Шестакова Л.В., Кычкин А.В. Синтез информационной системы управления подсистемами технического обеспечения интеллектуальных зданий // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 10 (109). С. 1191-1201.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

*В.Д. Марквирер<sup>1,2</sup>, А.В. Кычкин<sup>1</sup>, А.И. Дерябин<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики»,  
 кафедра информационных технологий в бизнесе,  
 факультет экономики, менеджмента и  
 бизнес-информатики;

<sup>2</sup>Пермский Национальный исследовательский  
 Политехнический университет,  
 кафедра строительного инжиниринга и  
 материаловедения  
 строительный факультет

#### Аннотация

Цифровизация энергоменеджмента на промышленных предприятиях предполагает внедрение технологий оптимизации потребления ресурсов в режиме на сутки вперед. В работе рассматривается метод динамической оптимизации энергопотребления, который разрабатывается в рамках проекта «Разработка промышленного интеллекта для повышения эффективности управления проветриванием горнодобывающего предприятия», выполняемого при поддержке гранта СТАРТ «Цифровые технологии». Проект предусматривает построение оптимальной траектории управления энергопотреблением с целью минимизации затрат на энергоресурсы при заданных ограничениях по параметрам безопасности ведения работ и требуемого объема выпуска продукции.

#### Введение

Процессы проветривания зданий и промышленных сооружений строго регламентируются правилами и законами, при этом объем подачи воздуха, как правило, задается сотрудниками вручную. Это приводит к необоснованным затратам ресурсов, что влияет в свою очередь на себестоимость производимых продуктов и услуг. В виду того, что все механизмы, обеспечивающие безопасность труда и жизни людей на предприятиях, также управляются вручную, имеется потенциал для снижения энергопотребления. Это возможно, потому что ручное управление может быть подвержено человеческому фактору. Рассматривая систему проветривания промышленного здания (вентиляцию), оператор может принудительно повысить объемный расход воздуха на величину большую, чем нужно по показаниям определенных датчиков (например, влажности воздуха, температуры, загазованности и другие), тем самым

энергии, необходимой для закачки свежего воздуха требуется больше теоретически обоснованного уровня, и наоборот. В свою очередь, объемный расход воздуха, его распределение внутри здания, уровень открытия изолирующих устройств и воздушных дверей зависит не только от внутренних показателей датчиков загазованности и пыли, но и от внешних факторов, а также от характеристик самого воздуха, его температуры, плотности и влажности.

Целью работы является построение оптимального плана энергопотребления на сутки вперед. В качестве исходных данных необходимо рассматривать:

а) прогнозные данные о потреблении энергоресурсов, полученные на основе снятых показаний об энергопотреблении в прошлом;

б) цены на электроэнергию в динамике.

При заданной дискретности в 60 минут (24 точки изменения) поставленную задачу предлагается решить с помощью метода динамического программирования (ДП).

В работе представлен анализ метода динамического программирования и постановка задачи оптимизации энергопотребления.

#### Метод динамического программирования

Зачастую управление промышленными механизмами на предприятиях основано на правилах («если..., то...»), то есть при определенном состоянии факторов, влияющих на выбор того или иного действия оператора, выбирается определенная стратегия. Данный подход является точным и достоверным, но при возрастании количества переменных, от которых зависит выбор действия, скорость получения ответа снижается экспоненциально. Иногда бывает сложно дать правильный ответ на определенную ситуацию, так как зависимость нескольких факторов может быть многозначной, также не все зависимости могут быть описаны в правилах, поэтому операторы иногда принимают решение наиболее простое и нетрудозатратное, которое не является оптимальным.

Для повышения эффективности и оптимальности принятия решений используют метод динамического программирования (ДП). В статье [1] метод динамического программирования относят к традиционным методам оптимизации принятия решения математического итеративного поиска, наряду с линейным и нелинейным программированием. *Эффективность* – некоторое числовое представление, характеризующее полученную выгоду принятия решения по оптимальному методу от прогнозных или среднестатистических значений. Оптимальность определяется *принципом оптимальности Беллмана*:

*Оптимальное поведение обладает тем свойством, что каковы бы ни были первоначальное состояние и решение в начальный момент, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния, получающегося в результате первого решения [2, 3].*

Таким образом, оптимальность – это набор наилучших действий, приводящих к наилучшему решению задачи.

Суть динамического программирования заключается в разбиении сложной задачи на маленькие подзадачи, связанные между собой. Причём пошаговое решение всех подзадач, начиная с известных начальных значений, приводит к нахождению общего оптимума [4-6]. Задачи принято решать «с конца», но возможен вариант прямого хода по шагам «с начала» [7].

Общие ограничения для метода динамического программирования:

- задача решается в конечном временном горизонте;
- задача решается в динамической дискретной по времени системе;

- стоимость решения накапливается с течением времени;

Цель динамического программирования – минимизация стоимости решений по всем шагам. Стоимостью может являться как денежным эквивалентом суммы затрат на всех шагах, общим временем, затраченным на переход из одного состояния в другое, так и общим расстоянием, преодоленным при решении задачи.

В общем виде функция, описывающая ожидаемое значение стоимости системы представлена ниже:

$$E_{opt} = \min\{g_N(x_N) + \min(\sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k))\}, \quad (1)$$

где  $k$  – момент времени,  $x_k$  – состояние системы в момент времени  $k$  (это состояние влияет на другие),  $u_k$  – решение, которое будет выбрано в момент времени  $k$  (управление, имеет ограничения на значения, которые определяются задачей),  $w_k$  – случайный шум, зависит от контекста,  $N$  – размерность системы (количество дискретных состояний),  $g_k$  – накопленная стоимость  $k$ -го шага,  $g_N$  – стоимость последнего шага.

#### Постановка задачи оптимизации энергопотребления

Для постановки задачи необходимо выделить основные элементы и ограничения [8]. Нагрузка в задаче – это система проветривания здания (вентиляция). Для систем проветривания используют накопитель энергии, чтобы обеспечить безотказную работу вентиляции в аварийной ситуации. Необходимо обеспечить оптимальный расход энергии, управляя накопителем вентиляции, зная цену на электроэнергию и параметры окружающей среды.

Проецируя общий метод динамического программирования на поставленную задачу оптимизации энергопотребления на промышленном предприятии, получаем следующие понятия. *Оптимальное энергопотребление* – это безопасный и менее затратный режим работы вентиляционного оборудования в течение суток, которое обеспечит достаточные условия для дыхания работников на производстве. При этом *эффективность* выражается в численном сокращении энергопотребления из накопителя системы вентиляции предприятия.

Для формализации задачи необходимо составить профиль нагрузки системы на сутки вперед, то есть 24 часа (24 точки) – прогноз. Цены на электроэнергию могут меняться в течение суток от пиковых значений в периоды интенсивной работы до минимальных значений в период простоя и малого спроса.

Необходимо понимать, что имеется минимальное значение нагрузки, которое будет постоянным, а есть переменные события, при которых нужно дать либо больше энергии системе или, наоборот, уменьшить потребление. Таким образом видим, что система находится в динамике и она должна постоянно подстраивать потребление энергии под заданный оптимальный ожидаемый график.

На каждый день должна строиться своя оптимальная траектория потребления при этом нужно также помнить, что необходимо поддерживать общую оптимальность на более длительные периоды: неделя / месяц / год, то есть учитывать фактическое потребление в день в выдаче прогноза на следующий день. Получается, что, зная историю потребления и прогноз на день вперед, можно контролировать общую оптимальность энергопотребления. При этом нельзя допускать сильного занижения относительно профиля потребления и завышения, так как это отобразится на будущем профиле.

Получается, что для данной задачи  $N = 24$  (часа),  $k = \{0, \dots, 23\}$  – каждый час в сутках,  $x_k$  – цена электроэнергии в момент времени  $k$ ,  $u_k$  – управление накопителем энергии в момент времени  $k$ ,  $w_k$  – непредвиденные затраты

(могут отсутствовать),  $g_k$  – накопленные затраты на энергию в момент времени  $k$ ,  $g_N$  – стоимость затрат на сутки. Управление имеет ограничения, которые описаны ниже.

$$\begin{cases} u_k > 0 \\ u_k \leq \text{critic\_value} \\ \frac{\text{total\_vol}}{N} * \alpha \leq \text{critic\_value} \leq \frac{\text{total\_vol}}{N} * 2\alpha \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\text{critic\_value}$  – параметр максимального предаварийного потребления,  $\text{total\_value}$  – ёмкость накопителя энергии,  $\alpha$  – доля накопителя, которую можно минимально потребить за один час (значение зависит от того, сколько времени выделяется на устранение аварийных ситуаций),  $2\alpha$  – максимально возможная доля потребления энергии в час.

На рис. 1 представлен график различных траекторий потребления электроэнергии в системе вентиляции за сутки. Оптимальная стратегия выделена чёрной сплошной линией, она показывает профиль потребления энергии в течение суток. Две других стратегии (траектории) отражают чрезмерное потребление.



Рис. 1. Выбор оптимальной траектории

### Заключение

В работе представлен краткий обзор особенностей динамического программирования, спроецированный на задачу оптимизации энергопотребления промышленного предприятия. Также дана постановка задачи получения стратегии оптимального энергопотребления, которую далее планируется решить, написав программу [9], вычисляющую оптимальный график энергопотребления в зависимости от цены электроэнергии и внешних условий. Далее также планируется изучить метод аппроксимированного динамического программирования, позволяющего значительно улучшить показатели времени реакции на возникающее событие, как, например, в логистической задаче о распределении инженеров обслуживания к поломкам [10, 11]. Также интересно будет рассмотреть связку динамического программирования с обучением с подкреплением, которое включает в себя поощрения за правильно выбранную стратегию и позволяет увеличить эффективность и экономия ресурсов [12].

Данный метод оптимизации энергопотребления можно предложить к реализации и внедрению на модули обработки управляющих сигналов системы управления зданием с IoT датчиками [13-15], с дальнейшим переходом системы в производственные комплексы.

### Список литературы:

1. Sap, Anny. «Searching for Policies in Python: An intro to Optimization» [Электронный ресурс]. – Р. 276

жим доступа: <https://annisap.medium.com/searching-for-optimal-policies-in-python-an-intro-to-optimization-7182d6fe4dba>, свободный - Загл. с экрана. (Дата обращения: 20.02.2021).

2. Гольдштейн А. Л. Теория принятия решений. Задачи и методы исследования операций и принятия решений : учебное пособие для вузов / А. Л. Гольдштейн. - Пермь: Изд-во ПГТУ, 2009.

3. Беллман, Р. Динамическое программирование / Dynamic Programming / Р. Беллман ; пер. с англ. И.М. Андреевой, А.А. Корбут, И.В. Романовского, И.Н. Соколовой и др. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с. : ил. – Режим доступа: <https://booksee.org/book/496344> (дата обращения: 20.02.2021).

4. J. Zhang, L. Chu, C. Guo, Z. Fu and D. Zhao, "A Novel Energy Management Strategy Design Methodology of a PHEV Based on Data-Driven Approach and Online Signal Analysis," in IEEE Access, vol. 9, pp. 6018-6032, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048783.

5. Динамическое программирование VS «Разделяй и властвуй» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://proglib.io/p/dp-vs-dc/>, свободный - Загл. с экрана. (Дата обращения: 20.02.2021).

6. Dynamic Programming [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geeksforgeeks.org/dynamic-programming/>, свободный - Загл. с экрана. (Дата обращения: 20.02.2021).

7. Динамическое программирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Динамическое\\_программирование](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Динамическое_программирование), свободный - Загл. с экрана. (Дата обращения: 20.02.2021).

8. Лежнёв А. В. Динамическое программирование в экономических задачах : учебное пособие / А. В. Лежнёв. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 176 с. : ил.

9. Динамическое программирование для начинающих [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tproger.ru/articles/dynprog-starters/>, свободный - Загл. с экрана. (Дата обращения: 20.02.2021).

10. Pechina, A., Usanov, D., van de Ven, P., & van der Mei, R. (2019). Real-time Dispatching and Relocation of Emergency Service Engineers. arXiv preprint arXiv:1910.01427.

11. Mes, Martijn & Rivera, Arturo. (2017). Approximate Dynamic Programming by Practical Examples. 10.1007/978-3-319-47766-4\_3.

12. Busoni, Lucian & De Schutter, Bart & Babuska, Robert. (2010). Approximate Dynamic Programming and Reinforcement Learning. Doi: 10.1007/978-3-642-11688-9\_1.

13. Кычкин А.В., Дерябин А.И., Викентьева О.Л., Шестакова Л.В. Архитектура сетевого управляющего комплекса здания на базе IoT-устройств // Датчики и системы. 2018. № 5 (225). С. 32-38.

14. Кычкин А.В., Артемов С.А., Белоногов А.В. Распределенная система энергомониторинга реального времени на основе технологии IoT // Датчики и системы. 2017. № 8-9 (217). С. 49-55.

15. Викентьева О.Л., Дерябин А.И., Шестакова Л.В., Кычкин А.В. Синтез информационной системы управления подсистемами технического обеспечения интеллектуальных зданий // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 10 (109). С. 1191-1201.