



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

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



УДК 62

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА РАНЖИРОВАНИЯ

**Воробьев С. А., Разумов П. А., Трофимов Е. С.**

ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-Строительный Университет", Санкт-Петербург, Россия (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4), e-mail: wolftier@mail.ru

Для моделирования теплоснабжения применена имитационная система моделирования. Модель оптимизирована для городских энергетических систем. Особое внимание уделено эффекту ранжирования, возникающему при использовании разных технологий отопления с различными переменными затратами. Было обеспечено условие одинаковых долей потребления тепла в зимнее и летнее время.

Ключевые слова: Теплоснабжение, имитационная модель, процессы, системы отопления, потери тепла.

## ENERGY BALANCE OF HEAT SUPPLY SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE RANKING EFFECT

**Vorobyev S.A., Razumov P.A., Trofimov E.S.**

FSBEI of HE "St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering", St. Petersburg, Russia (190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4), e-mail: wolftier@mail.ru

A simulation modeling system is used to simulate heat supply. The model is optimized for urban energy systems. Particular attention is paid to the ranking effect that occurs when using different heating technologies with different variable costs. The condition of equal shares of heat consumption in winter and summer was provided.

Keywords: Heat supply, simulation model, processes, heating systems, heat loss.

Первоначально модель VICUS была разработана для моделирования процессов преобразования одного вида энергоресурсов на входе в другой вид энергоресурсов на выходе [1]. VICUS - это модель линейного программирования для многотоварных энергетических систем с акцентом на оптимальные размеры и использование накопителей. С помощью этой программы моделируется энергетическая система с минимальной стоимостью, удовлетворяющая заданному временному ряду спроса на несколько товаров (например, электроэнергию). По умолчанию работает с часовыми интервалами (настраивается). Благодаря Pandas (быстрый, мощный, гибкий и простой в использовании инструмент анализа и манипулирования данными с открытым исходным кодом на основе языка программирования Python) выполняется комплексный анализ данных [2]. Сама модель имеет малый объем (<40 Кб исходного кода) и включает в себя функции создания отчетов и построения графиков. VICUS представляет собой упрощенную версию программы URBS [3]. Это оптимизационная модель линейного программирования для планирования расширения мощностей и

определения удельных затрат в распределенных энергетических системах. Его название, по-латыни означающее "город", связано с его происхождением как модели оптимизации городских энергетических систем. С тех пор он был адаптирован к различным масштабам - от районов до континентов [4-6].

Имитационная модель определяет наиболее оптимальную (с точки зрения затрат) конфигурацию энергетической системы, что приводит к «ранжированию» в случае, когда для обеспечения изменяющихся во времени потребностей используются разные технологии с различными переменными затратами. Дополнительные сведения об эффекте ранжирования изложены Зенсфуссом и др. на примере электроэнергетического сектора в [7]. В случае электроэнергии этот эффект ожидается всегда, когда все технологии (т.е. сеть энергоснабжения, солнечные панели и ветряные электростанции) фактически способны удовлетворять потребности в электроэнергии посредством сети распределения энергии.

Однако в случае потребления тепла каждое жилое и коммерческое здание для удовлетворения своих потребностей в отоплении использует отдельную отопительную систему [8, 9]. Соответственно, система отопления дома А не может быть использована для удовлетворения потребности в отоплении дома В. Однако, так как для целей моделирования все отдельные потребности в отоплении необходимо свести в единый профиль потребления, то в первоначальной модели VICUS такая ситуация могла иметь место.

В примере, описанном далее, эти обстоятельства раскрываются более подробно. Для обеспечения потребностей в тепле устанавливаются две различные системы отопления, каждая из которых включает процесс генерации тепла и хранилище горячей воды. 30% от их количества составляют системы резистивного отопления электричеством, 70% используют природный газ. Считается, что системы второго типа имеют меньшие переменные затраты.

В течение зимних месяцев обе системы работают на полную мощность, покрывая потребность в отоплении помещений и горячей воде. Доли потребления тепла, покрываемого системами, составляют  $\kappa_{рез}(зима) = 30\%$  и  $\kappa_{газ}(зима) = 70\%$ , соответственно. В течение летних месяцев помещения не нуждаются в отоплении, поэтому потребление тепла снижается до уровня потребления горячей воды, которое в это время может обеспечивать любая из систем отопления. В первоначальной версии системы VICUS выбор был сделан в пользу газовых котлов ( $\kappa_{газ}(лето) = 100\%$ ), так как их переменные расходы меньше по сравнению с отопительной системой с резистивным нагревом (рис. 1). Недостатком этого решения является то, что домашние хозяйства и офисные здания, оборудованные электрическими системами отопления, должны будут отказаться от использования горячей воды ( $\kappa_{рез}(лето) = 0\%$ ), а в зданиях с системами отопления, работающими на природном газе, вырабатывается слишком много тепла.

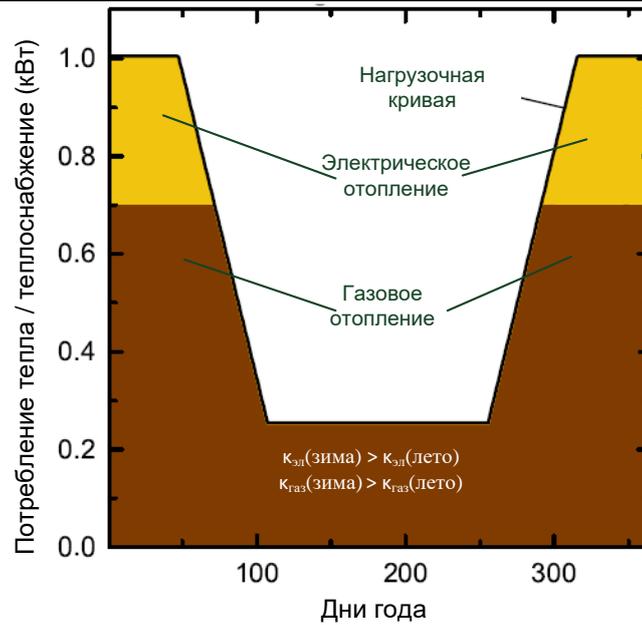


Рисунок 1 – Первоначальная версия модели VICUS

Для того, чтобы устранить этот эффект была введена дополнительная система уравнений и переменных. Это позволяет обеспечить, условие  $\kappa_p(\text{зима}) = \kappa_p(\text{лето}) = const$  для каждой системы отопления и покрывает фиксированную долю потребления тепла в течение всего года.

На первом этапе потребовалось сформировать четыре идентичные системы хранения горячей воды и присвоить каждую из них одному из четырех процессов отопления в имитационной модели: резистивное отопление электричеством; электрический тепловой насос, использующий теплоту воздуха; котлы, работающие на природном газе или топочном мазуте. На втором этапе для каждой системы была определена независимая от времени переменная  $\kappa_p$ , представляющая соответствующую долю потребления тепла, которая определяется как:

$$\kappa_p = \frac{E_p^{out}(t, c^{in, heat}) + \overbrace{E_s^{out}(t, heat) - (E_s^{in}(t, heat) - E_w^{in}(t, heat, \text{потери}))}^{\text{излишки генерации}}}{\underbrace{(D(t, heat) \cdot \gamma(heat))}_{\text{потребление тепла}}} \quad \forall t \in [1.8760]$$

где  $E_p^{out}$  – выходная энергия одного из четырех процессов,

$t$  – время,  $E_s^{out}$  – выходная энергия хранилища,  $E_s^{in}$  – входная энергия хранилища,

$E_w^{in}$  – энергия потерь,

$\Delta_s$  – количество энергии, отдаваемое или запасаемое соответствующим хранилищем горячей воды,  $c^{in}$  – исходный энергоресурс (солнечная энергия, энергия ветра, сетевое электричество, природный газ, мазут, теплоэнергия и др.),

heat – переменная модели, означающая «тепло»,

$D(t, heat)$  – потребность в тепле,  $\gamma(heat)$  – пиковые нагрузки при потреблении тепла.

Например, для газового котла:

$$\kappa_{\text{кот\_газ}} = \frac{E_{\text{кот\_газ}}^{\text{out}}(t, \text{gas, heat}) + \overbrace{E_{\text{кот}}^{\text{out}}(t, \text{heat}) - (E_{\text{кот}}^{\text{in}}(t, \text{heat}) - E_{\text{w}}^{\text{in}}(t, \text{heat, потери}))}^{\Delta s \text{ излишки генерации}}}{\underbrace{(D(t, \text{heat}) \cdot \gamma(\text{heat}))}_{\text{потребление тепла}}}$$

Энергия потерь обеспечивает возможность выработки излишков тепла путем уничтожения избытков тепла. Это применимо только к случаям, в которых рассматриваются процессы комбинированного производства тепла и электроэнергии, так как в этом случае обеспечивается возможность генерации электроэнергии в периоды низкого потребления тепла или его отсутствия.

Последний этап заключается в введении ограничения, обеспечивающего покрытие потребностей в отоплении всеми процессами в совокупности, описывающееся уравнением вида:

$$\sum_p \kappa_p = \kappa_{\text{котел\_газ}} + \kappa_{\text{котел\_мазут}} + \kappa_{\text{рез}} + \kappa_{\text{насос}}$$

Значения переменной  $\kappa_p$  определяются во время работы имитационной модели. Результат этого подхода показан на Рисунке 2.

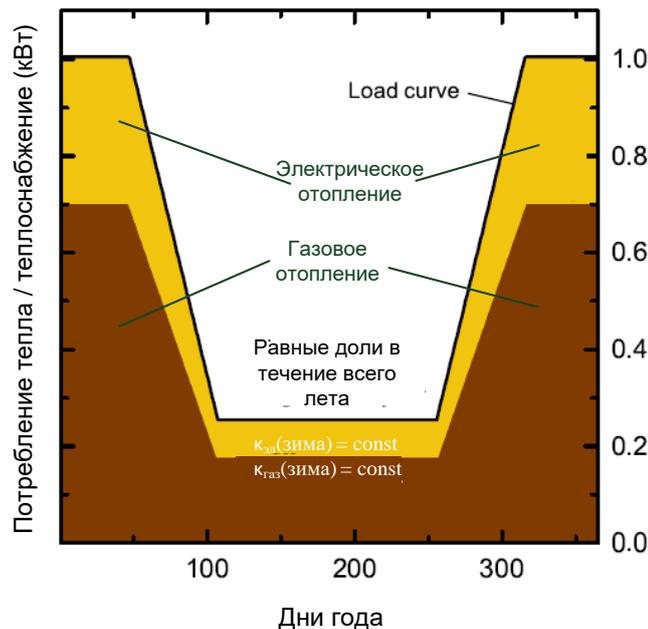


Рисунок 2 – Изменение модели VICUS с целью обеспечения реалистичного распределения тепла

Этот подход служит только для введения ограничения, обеспечивающего условие, что доля процесса снабжения тепла остается неизменной в течение года.

Выводы. Для уточнения имитационной модели теплоснабжения реализован подход ранжирования процессов отопления. Предложенный подход позволяет более рационально использовать энергию от различных видов источников и делает модель более точной. Соответственно, и результаты прогнозирования будут иметь большую точность и достоверность.

### Список литературы

1. VICUS // Technical University of Munich – Institute of Renewable and Sustainable Energy Systems. URL: <https://github.com/ojdo/vicus#readme> (дата обращения: 25.03.2023)
2. Pandas URL: <https://pandas.pydata.org/> (дата обращения: 25.03.2023)
3. Dorvner J., Hamacher T. URBS – a model of linear optimization of distributed energy systems // Technical University of Munich – Institute of Renewable and Sustainable Energy Systems. URL: <https://github.com/tum-ens/urbs> (дата обращения: 25.03.2023)
4. Hetterich B. et al. Optimal energy supply system and hourly operation plan for the TUM campus Garching using linear programming model URBS // Proceedings of ECOS 2016. – 2016. – С. 15.
5. Kriechbaum L., Scheiber G., Kienberger T. Grid-based multi-energy systems modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges // Energy, Sustainability and Society. – 2018. – Т. 8. – № 1. – С. 1-19.
6. Stüber M., Odersky L. Uncertainty modeling with the open source framework URBS // Energy Strategy Reviews. – 2020. – Т. 29. – С. 100486.
7. Sensfuß F., Ragwitz M., Genoese M. The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany // Energy policy. – 2008. – Т. 36. – № 8. – С. 3086-3094.
8. Гашо Е. Г., Козырь А. В. О комплексной оценке эффективности отопительных систем зданий в нерасчетных режимах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2003. – № 3-4. – С. 3-12.
9. Казачков В. С., Шалай В. В., Попов А. А. Расчет значения погрешности системы индивидуального учета и распределения потребления тепла в многоквартирных домах // Омский научный вестник. – 2009. – № 3 (83). – С. 141-144.

### References

1. VICUS // Technical University of Munich – Institute of Renewable and Sustainable Energy Systems. URL: <https://github.com/ojdo/vicus#readme> (accessed: 03/25/2023)
2. Pandas URL: <https://pandas.pydata.org/> (accessed: 03/25/2023)
3. Dorvner J., Hamacher T. URBS – a model of linear optimization of distributed energy systems // Technical University of Munich – Institute of Renewable and Sustainable Energy Systems. URL: <https://github.com/tum-ens/urbs> (accessed: 03/25/2023)
4. Hetterich B. et al. Optimal energy supply system and hourly operation plan for the TUM campus Garching using linear programming model URBS // Proceedings of ECOS 2016. – 2016. – pp. 15.
5. Kriechbaum L., Scheiber G., Kienberger T. Grid-based multi-energy systems modeling, assessment, open source modeling frameworks and challenges // Energy, Sustainability and Society. – 2018. – Vol. 8. – No. 1. – pp. 1-19.
6. Stüber M., Odersky L. Uncertainty modeling with the open source framework URBS // Energy Strategy Reviews. – 2020. – Vol. 29. – pp. 100486.

7. Sensfuß F., Ragwitz M., Genoese M. The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany // Energy policy. - 2008. – Vol. 36. – No. 8. – pp. 3086-3094.
  8. Gasho E. G., Kozyr A.V. On a comprehensive assessment of the efficiency of heating systems of buildings in non-accounting modes // Izvestiya higher educational institutions. Energy problems. - 2003. – No. 3-4. – pp. 3-12.
  9. Kazachkov V. S., Shalai V. V., Popov A. A. Calculation of the error value of the system of individual accounting and distribution of heat consumption in apartment buildings // Omsk Scientific Bulletin. – 2009. – № 3 (83). – pp. 141-144.
-