

*Кутиков П.А.*

*студент магистратуры*

*1 курс, факультет «Элитного образования и магистратуры»*

*Омский государственный технический университет*

*Россия, г. Омск*

*Готфрид П.А.*

*студент магистратуры*

*1 курс, факультет «Элитного образования и магистратуры»*

*Омский государственный технический университет*

*Россия, г. Омск*

*Броцман С.А.*

*студент магистратуры*

*1 курс, факультет «Элитного образования и магистратуры»*

*Омский государственный технический университет*

*Россия, г. Омск*

**АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ: «ВЛИЯНИЕ ГРАФИКОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА РАСЧЕТ ПОТЕРЬ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ»**

*Аннотация:* В последние годы в публикациях ученых и специалистов в области электроэнергетики часто говорится о необходимости уменьшения потерь при передаче электроэнергии. Среди различных способов достижения этой цели простотой, доступностью и эффективностью выделяется способ выравнивания графика нагрузки предприятия. В данной статье рассмотрены и проанализированы труды ученых, занимающихся анализом потерь мощности и электроэнергии, разработкой методик по расчету потерь и изучением влияния графиков нагрузок на потери в электроэнергетической сети.

**Ключевые слова:** *потери электроэнергии, график нагрузки, коэффициент формы, методы расчета нагрузочных потерь, электрическая сеть.*

**Annotation:** *In recent years, the publication of scientists and specialists in the field of energy often speaks about the need for losses in the transmission of electricity. One of the ways to achieve this goal is the ability to equalize the load schedules of the enterprise. This article reviewed and analyzed the works of scientists involved in the analysis of power and electricity losses, the development of methods for calculating losses and studying the effect of graphs on losses in the electricity grid.*

**Keywords:** *electric power losses, load graph, form factor, methods for calculating load losses, electric network.*

В настоящее время потери электроэнергии являются серьезной проблемой как для энергетики, как для предприятий, которые поставляют электрическую энергию потребителям, так и для самих потребителей. Увеличение или уменьшение потерь прямо влияет на затраты на эксплуатацию электроэнергии, так и на ее цену. Одним из основных интегральных показателей энергоэффективности использования поступающей на предприятие электроэнергии является график электрической нагрузки. Неравномерность графиков нагрузок является результатом увеличения потерь электрической энергии в сетях. Это значительно влияет на срок службы электрических сетей, в особенности кабельных линий. В данное время в России действует государственная подпрограмма «Энергоэффективность и развитие энергетики», которая предусматривает создание мероприятий по снижению потерь электроэнергии. Далее рассмотрим статьи ученых, которые занимались изучением методов расчета потерь электроэнергии и влиянием графиков нагрузок на них. Проанализируем их цели и увидим, какие выводы они сделали.

В статье ученых Шведова Г.В. и Азарова А.Н. была проанализирована необходимость учета изменяющихся метеорологических факторов при расчете нагрузочных потерь электроэнергии в проводах воздушных линий за календарный год. В ходе работы предоставлялась возможность выбора температуры провода либо равной фактической, либо усредненной за расчетный период. В итоге были получены результаты расчета годовых нагрузочных потерь двумя способами: методом оперативных расчетов и методом средних нагрузок [1].

В публикации Куликова А.Л., Шарыгина М.В., Вуколова В.Ю. предложен новый вероятностный имитационный метод генерации псевдослучайного графика нагрузки по заданным параметрам. В результате был приведен пример реализации такого графика тока элементарной нагрузки одной смены, полученного с помощью разработанного алгоритма. Предложенный метод можно рассматривать как новый элемент системы обеспечения надежности электроснабжения [2].

В статье Ягольниковой Е.Б. «Расчет и анализ составляющих потерь электроэнергии на примере ОАО «ММК»» была разработана математическая модель в системе MATLAB SIMULINK, которая позволяет производить расчет нагрузочных потерь в воздушных и кабельных линиях, в трансформаторах. Еще с помощью данной модели возможно изучение влияния режимов на величину потерь [3].

В работе доктора технических наук Грачевой Е.И. предлагался алгоритм по разработке регрессионных моделей для анализа потерь электроэнергии в низковольтных сетях. На основе результатов исследований были сделаны следующие выводы:

- при определении и прогнозировании потерь электроэнергии целесообразно составлять специализированные модели, выходные величины которых следует рассматривать в функции обобщенных параметров сети, используя регрессионный анализ;

- вероятностно-статистические модели для определения эквивалентного сопротивления цеховых сетей позволяет учесть такие параметры, как длина, количество, загрузка и сечение линий сети, а также температура окружающей среды. Такие модели достаточно прочно учитывают динамику изменения электрических сетей, а значит, пригодны для многократного использования;
- представленная аналитическая зависимость, позволяет определить эквивалентное сопротивление радиальных цеховых сетей с погрешностью, не превышающей 10% [4].

В статье профессора Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, а именно Куликова А.Л., рассматривается статистический метод, основанный на проверке гипотез для прогнозирования тренда графика нагрузки. Данный метод обладает высокой точностью и является эффективным средством для снижения потерь в трансформаторной группе понизительных подстанций и повышения надежности электроснабжения [5].

В работе Божкова М.И. и еще нескольких ученых «Метод спектрального анализа графиков электрических нагрузок» был предложен метод спектрального представления графиков нагрузки городской подстанции 110/10 кВ на основе данных, полученных с помощью АИИС КУЭ за отчетный годовой период. А также разработан метод построения интегральных диаграмм суточных графиков мощности в точках отпуска электрической энергии [6].

В публикации исследователей Божкова М.И. и Костина В.Н. «Анализ графиков нагрузки подстанций на базе данных АИИС КУЭ» полученные на базе данных АИИС КУЭ годовые коэффициенты заполнения и формы графиков нагрузок можно использовать как статистические данные при проектировании новых подстанций, а также для анализа электропотребления существующих подстанций, не оснащенных АИИС КУЭ, но имеющих похожий состав потребителей [7].

В статье кандидатов технических наук Божкова М.И. и Костина В.Н. выполнялись сравнительные расчеты потерь электроэнергии на подстанциях 110/10 кВ различными методами на основе данных АИИС КУЭ. В результате были выявлены зависимости погрешностей расчета потерь электроэнергии от объема и достоверности исходной информации [8].

В работе Божкова М.И. и Пущина С.Л. описывались результаты обследования сообщества абонентов городской подстанции высокого напряжения. В процессе работы был предложен вариант трехзонного тарифа на электроэнергию для городских потребителей, при котором в выигрыше будут все субъекты рынка электрической энергии:

- для генерирующих компаний выравнивание графика нагрузки приводит к снижению удельного расхода топлива;
- для сбытовых компаний увеличится объем услуг по договорам электроснабжения;
- для населения снизится плата за электрическую энергию [9].

В последней подобранной российской статье ученых из НИУ «МЭИ» Некрасова С.А., Матюниной Ю.В., Цырук С.А. рассказывается о создании некой агрегированной генерирующей компании (АГК), которая адаптировала бы к нашим условиям опыт зарубежных компаний [10]. Первоочередными задачами АГК являются:

- выравнивание графика нагрузки энергосистемы;
- повышение эффективности использования существующих мощностей;
- сокращение удельных расходов топлива.

Данные задачи будут решаться в результате изменения технологических процессов у потребителей, позволяющих снижать потребление в период прохождения максимума нагрузки, что эквивалентно созданию новых пиковых электростанций.

Обзор произведенных разработок в области уменьшения потерь электроэнергии был бы не полным без рассмотрения зарубежного опыта в данном направлении. Далее рассмотрим исследования зарубежных ученых.

В иностранной статье автора Maria Teresa Costa-Campi «Экономическое влияние потерь энергии» оценивалось влияние моделей потребления и различных технологий генерации на потери энергии и стоимость потерь. Для этого были использованы данные из реальной системы электроснабжения с высоким уровнем проникновения возобновляемых источников энергии, а именно из Испании, в период с 2011 по 2013 год [11].

Зарубежная статья ученого Named Nafisi. Здесь рассказывается об использовании гибридных электромобилей с подключаемыми модулями (PHEV). Эти транспортные средства, как переносные нагрузки и источники энергии, могут быть подключены к стандартным розеткам дома. В данной статье представлен двухэтапный метод оптимизации для минимизации потерь энергии в микросетях с различными уровнями проникновения PHEV. На первом этапе предлагается новая выпуклая квадратичная целевая функция для активного управления мощностью PHEV, а суточная необходимая энергия PHEV рассчитывается на основе стохастической модели поведения владельцев PHEV. Предполагается, что PHEV могут использоваться в качестве распределенных конденсаторов. Следовательно, реактивная мощность PHEV указывается на втором этапе. После этого предложенная методология применяется к реалистичной распределительной сети. Будет показано, что потеря энергии в сети, вероятно, значительно возрастет в случае увеличения уровня проникновения PHEV без стратегии интеллектуальной зарядки; чтобы минимизировать потери энергии в сети, необходимо рассмотреть схему интеллектуального управления [12].

Зарубежная статья исследователя Anya Castillo. В этой статье предлагается составление оптимальной схемы постоянного тока (DCOPF) с формулировкой потерь (проблема -DCOPF + S) и ее использование для

исследования роли реальных потерь мощности в интегрированной системе хранения на основе OPF. Сначала выводим проблему  $\lambda$ -DCOPF + S, дополняя стандартную задачу DCOPF с хранением (DCOPF + S), чтобы включить в нее квадратичные приближения реальной потери мощности. Эта процедура приводит к многопериодной невыпуклой квадратично ограниченной квадратичной программе, которая, как мы доказываем, может быть оптимально решена с помощью полуопределенного или конусного расслабления второго порядка. Этот подход имеет ряд важных преимуществ по сравнению с существующими моделями. Он является более вычислительно управляемым, чем ACOPF с накопительными (ACOPF + S) формулировками, и доказуемо точные выпуклые релаксации гарантируют, что оптимальное решение может быть найдено для выполнимой задачи [13].

В статье китайского ученого Kun Yang рассказывается об энергоэффективности будущих беспроводных сетей. Распределение ресурсов и ассоциация пользователей являются решающими факторами для удовлетворения потребностей пользователей и экономии энергии. В этой статье рассматривается оптимизация распределения ресурсов и проблема ассоциации пользователей как в сценарии с низкими данными, так и с высокими требованиями к данным. В сценарии с низким требованием к данным возникает проблема минимизации энергопотребления сети. В сценарии с высокими требованиями к данным исследуется проблема максимизации покрытия скорости путем корректировки распределения полосы пропускания и ассоциации пользователей [14].

Статья зарубежного ученого Aylin Yener. Здесь рассматривается сеть сбора энергии, где передатчик собирает энергию от природы, и собранная энергия может быть сохранена в несовершенной батарее, которая страдает от неэффективности зарядки / разрядки. Затем определяется оптимальный график мощности передачи в автономном режиме для такой системы для моделей с одним пользователем и широкополосным каналом, для

статических каналов и каналов с замиранием, с конечным размером батареи и без нее. Это показывает, что оптимальная политика - это политика с двумя порогами: в частности, мы храним энергию в батарее, только когда собранная энергия превышает верхний порог, и извлекаем энергию из батареи только тогда, когда собранная энергия ниже нижнего порога. А когда собранная энергия находится между этими двумя порогами, мы используем ее полностью в текущем интервале. А также эти два порога остаются постоянными, если батарея не разряжена или не полностью заряжена [15].

В статье иностранного ученого Iain Staffell рассматривается эволюция кривых нагрузки к 2050 году в Германии и Великобритании: две страны претерпевают радикально различные преобразования энергии. В нем рассматриваются последние изменения в европейском спросе на электроэнергию и представлены две модели для синтеза будущих часовых кривых нагрузки: eLOAD (регулировка кривой нагрузки для электроэнергии) и DESSTinEE (спрос на энергетические услуги, поставки и передачу в Европу). Обе модели применяются к сценарию декарбонизации на 2050 год и постоянно показывают пиковые нагрузки, увеличивающиеся примерно на 23% по сравнению с изменением годового спроса, до 103 ГВт в Германии и 92 ГВт в Великобритании [16].

В публикации автора Diansheng Luo «Метод оценки устойчивости распределительной сети с упором на критические нагрузки» предлагается метод оценки устойчивости распределительных сетей путем сосредоточения внимания на воздействии критических нагрузок при экстремальных погодных явлениях, а тайфун берется в качестве представителя для формулирования кривой уязвимости компонентов. Кроме того, метод Монте-Карло используется для моделирования всего процесса экстремальной погодной катастрофы и для генерации сценария сбоя. Результаты показывают, что этот метод эффективен для количественной оценки устойчивости распределительных сетей в условиях экстремальных погодных явлений [17].



Зарубежная статья ученого Nor Erniza Mohammad Rozali. Эта работа расширяет исследование, изучая влияние пикового сдвига нагрузки на емкость хранилища в гибридных энергосистемах HPS. Влияние потерь энергии из-за неэффективности при преобразовании, передаче и хранении энергии в HPS учитывается при разработке смещающей эвристики для обеспечения достижения оптимального размера хранилища. Реализация предложенной стратегии смещения нагрузки в тематическом исследовании демонстрирует, что может быть достигнуто сокращение размера хранилища до 30%, что привело к минимальной стоимости хранилища. Распределение спроса в часы пик также успешно обеспечивает значительную экономию на счетах за электроэнергию [18].

В работе исследователя Elimar Frank описывается общий и систематический метод расчета эффективности и годовой производительности систем Power-to-Gas (PtG). Этот подход дает основу для аналитического сравнения различных систем PtG, использующих различные технологии в различных граничных условиях. Чтобы иметь сопоставимую основу для расчетов эффективности, делается структурированный анализ системы PtG. В результате показано, что для полной оценки работы системы и дальнейшей разработки концепции системы, годовая производительность имеет гораздо более важное значение, чем эффективность стационарной системы, на которую обычно ссылаются [19].

В последней подобранной иностранной статье автора Ong Hang See предлагается система динамического планирования нагрузки в жилых помещениях (DRLS) для оптимального планирования бытовых приборов на основе схемы ценообразования с адаптивным уровнем потребления (CL) (ACLPS). Предложенная система планирования нагрузки поощряет потребителей управлять своим потреблением энергии в пределах допустимого уровня потребления (CA) предлагаемой схемы ценообразования DR для достижения более низких счетов за электроэнергию. Результаты

моделирования показывают, что использование предложенной системы DRLS приносит пользу потребителям за счет сокращения их счетов за электроэнергию и коммунальных компаний за счет снижения пиковой нагрузки совокупного спроса на нагрузку. Для данного конкретного примера предлагаемая система планирования нагрузки для жилых помещений, основанная на ACLPS, позволяет клиентам снизить счета за электроэнергию до 53% и снизить пиковую нагрузку до 35% [20].

В конце рассмотрим диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук Брагина А.А. на тему «Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности». Цель работы состояла в том, чтобы повысить энергоэффективность производства и передачи электрической энергии в электротехническом комплексе предприятия путем регулирования режимов электропотребления с использованием аккумуляторных батарей в качестве потребителей мощности [21]. В ходе работы был произведен анализ энергоэффективности работы электрической сети в зависимости от регулирования графика нагрузки, была определена зависимость эффективности работы сети от степени равномерности графика нагрузки и разработан метод формирования графиков нагрузки при использовании накопителей энергии в виде аккумуляторных батарей.

В заключение данного обзора можно сказать, что рассматривая работы ученых, описанных выше, можно сделать вывод, что проблема потери энергии очень глобальна в нашем мире. На данный момент в мире не существует универсального метода оценки потерь мощности и электроэнергии на основе ограниченной информации об оперативном состоянии электрического оборудования. Целесообразность использования определенного метода расчёта потерь определяется, прежде всего, возможностью получения достоверной информации для его реализации и погрешностью метода.

Исходя из вышеперечисленных статей можно сделать вывод, что графики электрических нагрузок влияют на значение потерь электроэнергии. Значит нужно стремиться к выравниванию данных графиков для снижения потерь электрической энергии в сетях.

### **ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Шведов Г.В. Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий/ Шведов Г.В., Азаров А.Н.// Электричество. 2016. - №2. – С. 11-18.

2. Куликов А.Л. Метод имитирования случайного графика нагрузки с заданными параметрами для обучения автоматики электроснабжения/ Вуколов В.Ю., Куликов А.Л., Шарыгин М.В.// Вестник НГИЭИ. 2017. - №3(70). – С. 40-49.

3. Ягольникова Е.Б. Расчет и анализ составляющих потерь электроэнергии на примере ОАО «ММК»/ Ягольникова Е.Б., Рудаков Н.А., Шошин М.А.// Электротехнические системы и комплексы. 2016. - №4(33). – С. 25-28.

4. Грачева Е.И. Разработка регрессионных моделей для анализа и прогнозирования потерь электроэнергии в низковольтных сетях/ Грачева Е.И., Серпионова Т.А.// Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2015. - №2(26). – С. 45-51.

5. Куликов А.Л. Метод распознавания тренда графика нагрузки в автоматике отключения силовых трансформаторов/ Куликов А.Л., Шарыгин М.В., Ворошилов А.А.// Электричество. 2018. - №10. – С. 20-29.

6. Божков М.И. Метод спектрального анализа графиков электрических нагрузок/ Божков М.И., Пушин С.Л.// Промышленная энергетика. 2015. - №2. – С. 25-28.

7. Божков М.И. Анализ графиков нагрузки подстанций на базе данных АИИС КУЭ/ Божков М.И., Костин В.Н.// Промышленная энергетика. 2017. - №1. – С. 13-18.

8. Божков М.И. Использование данных АИИС КУЭ для сравнительной оценки методов расчета потерь электроэнергии / Божков М.И., Костин В.Н.// Промышленная энергетика. 2017. - №3. – С. 14-18.
9. Божков М.И. Техноэкономический подход к формированию графика нагрузки гарантирующего поставщика/ Божков М.И., Пуцин С.Л.// Промышленная энергетика. 2017. - №4. – С. 43-47.
10. Некрасов С.А. Оптимизация электроснабжения с целью выравнивания графика нагрузки и снижения энергозатрат/ Некрасов С.А., Матюнина Ю.В., Цырук С.А.// Промышленная энергетика. 2015. - №5. – С. 2-8.
11. Maria Teresa Costa-Campi, Daniel Davn-Arderius, Elisa Trujillo-Baute. The economic impact of electricity losses/ Energy economics – 2018. Vol. 75. P. 309–322.
12. Hamed Nafisi, Seyed Mohammad Mousavi Agah, Hossien Askarian Abyaneh, Mehrdad Abedi. Two-Stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of PHEVs/ IEEE Transactions on smart grid – 2017. Vol. 7. P. 1268–1276.
13. Anya Castillo, Dennice F. Gayme. Evaluating the effects of real power losses in optimal power flow based storage integration/ IEEE Transactions on control of network systems – 2017. Vol. 5. P.1132–1145.
14. Kun Yang, Lin Wang, Shuo Wang, Xing Zhang. Optimization of resource allocation and user association for energy efficiency in future wireless networks/ IEEE Access – 2017. Vol. 5. P. 16469–16477.
15. Kaya Tutuncuoglu, Aylin Yener, Sennur Ulukus. Optimum policies for an energy harvesting transmitter under energy storage losses/ IEEE Journal on selected areas in communications – 2017. Vol. 33. P. 467–481.
16. T. Boßmann, I. Staffell. The shape of future electricity demand: Exploring load curves in 2050s Germany and Britain/ Energy – 2015. Vol. 90. P.1317–1333.

17. Diansheng Luo, Yongwei Xia, Yuanyuan Zeng, Canbing Li, Bin Zhou, Hao Yu, Qiuwei Wu. Evaluation method of distribution network resilience focusing on critical loads/ IEEE Access – 2018. Vol. 6. P. 61633–61639.
18. Nor Erniza Mohammad Rozali, Wai Shin Ho, Sharifah Rafidah Wan Alwi, Zainuddin Abdul Manan. Peak-off-peak load shifting for optimal storage sizing in hybrid power systems using Power Pinch Analysis considering energy losses/ Energy – 2018. Vol. 156. P. 299–310.
19. Elimar Frank, Jachin Gorre\* , Fabian Ruoss, Markus J. Friedl. Calculation and analysis of efficiencies and annual performances of Power to-Gas systems/ Applied energy – 2018. Vol. 218. P. 217–231.
20. Haider Tarish Haider, Ong Hang See, Wilfried Elmenreich. Dynamic residential load scheduling based on adaptive consumption level pricing scheme/ Electric power systems research – 2016. Vol. 133. P. 27–35.
21. Брагин А.А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности: автореферат дис. кандидата технических наук/ Брагин Антон Александрович; [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой ун-т "Горный"]. - Санкт-Петербург, 2013. - 20 с.