

## МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ДОМОХОЗЯЙСТВАХ

Гребенюк Г. Г.<sup>1</sup>, Крыгин А. А.<sup>2</sup>, Середа Л. А.<sup>3</sup>

(ФГБУН Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

*Рассматривается подход к оптимизации энергопотребления в домохозяйствах, позволяющий снизить трудоемкость расчетов активными потребителями экономически выгодных режимов бытовых приборов. На основе анализа применяемых методов оптимизации режимов энергопотребления выявлены причины, ограничивающие применение этих методов в практике домохозяйств. Одна из них заключается в наличии данных по оптимизируемым бытовым приборам и ограничениям. Выполнена формализация требований к режимам использования бытовых приборов с циклическим, термостатическим и комбинированным режимами работы. Показаны особенности формирования ограничений в задаче линейного программирования и предложена методика оптимизации режимов, доступная по трудоемкости активному потребителю. Приведены результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенной методики.*

Ключевые слова: энергоэффективность, энергоменеджмент, домохозяйство.

### 1. Введение

Динамика изменения нагрузок электрических бытовых приборов оказывает значительное влияние на режимы работы энергосистемы любой страны. Неравномерность суточной нагрузки вызывает переход энергоблоков к неоптимальным режимам работы [15], для которых характерен значительный удельный расход топлива и стоимость производства энергии. Система переменных тарифов направлена на снижение неравномерности и объема энергопотребления различными группами потребителей, в том числе домохозяйствами. Со стороны потре-

---

<sup>1</sup> Георгий Григорьевич Гребенюк, д.т.н., г.н.с. (gggrebenuk@gmail.com).

<sup>2</sup> Андрей Александрович Крыгин, к.т.н., с.н.с. (andreyakr@yandex.ru).

<sup>3</sup> Леонид Анатольевич Середа, н.с. (sereda@lab49.ru).

бителей имеется мотивация к снижению затрат путем изменения графика работы бытовых приборов таким образом, чтобы общая стоимость потребленной энергии была минимальной. Для реализации данной мотивации на практике потребитель должен определить оптимальные режимы работы своих приборов. Это не тривиальная задача, для решения которой в помощь потребителю создаются специальные методики и программы оптимизации.

Предметом настоящего исследования является разработка методики оптимизации режимов энергопотребления бытовых приборов, удобной для практического использования в жилом секторе. Работы в этой области [5–8, 11–14, 16, 17, 18–22, 23] можно отнести к теоретическим. Они содержат этапы формализации задачи, вывода необходимых уравнений, неравенств, выбора оптимизируемой функции. С использованием компьютерного моделирования находится оптимальный график и оценивается экономическая выгода.

Описанный подход в силу сложности восприятия потребителем не реализуется на практике. Разрабатываемая в статье методика оптимизации энергопотребления содержит алгоритмы, учитывающие доступность получения данных для ввода в программу оптимизации. Основная часть этих данных вводится непосредственно из паспортных характеристик бытовых приборов и лишь для приборов с термостатическим управлением потребовалась дополнительная простая методика измерения значений двух параметров, необходимых для решения общей оптимизационной задачи.

Статья состоит из двух частей: в первой части формулируются постановка задачи и требования к математической модели энергопотребления, во второй части предлагаются математические модели для описания функционирования конкретных бытовых электроприборов.

## **2. Математическая модель оптимизации энергопотребления**

### *2.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ*

Анализ работ [5–8, 11–14, 16, 17, 18–22, 23] показал, что основная причина, по которой практическое применение изложенных в них методик оптимизации затруднено, заключается в использовании сложных математических моделей, подготовка входных данных для которых требует определенной квалификации пользователя. Во многих случаях такие методики ориентированы на применение в инфраструктуре «умных» сетей [17].

Типовая схема взаимодействия между потребителем и используемой им программой оптимизации энергопотребления состоит из следующих этапов:

1. Определение электроприборов, подлежащих оптимизации. Формализация функциональных требований к приборам.
- 2) Ввод в программу оптимизации необходимых для расчета данных.
- 3) Расчет графиков работы электроприборов данной группы.

Этап 1. Определение электроприборов, подлежащих оптимизации. Формализация функциональных требований к приборам

Сгруппируем множество различных видов приборов в подмножества и определим для каждого из них структуру входных данных для программы оптимизации. При этом разделим входные данные на две части, описывающие паспортные характеристики прибора и функциональные требования пользователя к прибору.

1. Приборы, не подлежащие оптимизации.

К этому подмножеству относятся приборы, для которых невозможно формализовать функциональные требования, либо, наоборот, приборы, для которых программа работы точно задана. В него включены все приборы, запуск и остановку которых осуществляет пользователь (электрическая плита, компьютер, пылесос) и приборы с заданной автоматической программой работы, например, записывающий по таймеру рекордер. К это-

му подмножеству также можно отнести и осветительные приборы [24].

## 2. Приборы с циклическим режимом работы.

К этому подмножеству относятся приборы, у которых цикл работы состоит из выполнения заданного (по потребляемой энергии и времени выполнения) ряда операций: стиральные и посудомоечные машины, зарядные устройства и др.

Необходимый набор паспортных характеристик прибора для программы оптимизации у этого подмножества можно представить следующим образом:

- время выполнения цикла работы (или каждой операции цикла);
- количество потребляемой энергии за цикл (или каждой операции цикла).

Например, цикл работы посудомоечной машины состоит из трех операций: нагрев воды, мытье посуды и сушка.

Функциональные требования к приборам этого подмножества определяются интервалом времени, в течении которого прибор должен начать или закончить свою работу. Например, требуется зарядить ноутбук к семи часам утра.

## 3. Приборы с термостатическим управлением.

К этому виду относятся приборы, которые предназначены для поддержания температуры в заданных пределах, такие как кондиционеры, обогреватели, холодильники, морозильники. Можно определить алгоритм их включения и выключения, зависящий от температуры внутри прибора (назовем ее «внутренняя температура») и температуры окружающей среды («внешняя температура»).

Паспортные данные этого подмножества приборов включают только потребляемую мощность, а функциональные требования заключаются в том, что внутренняя температура должна находиться в заданном диапазоне. В таблице 1 конкретизируются понятия внутренней и внешней температуры и диапазона комфортных температур для основных приборов этого подмножества.

К перечисленным величинам необходимо добавить еще две, характеризующие скорость изменения внутренней темпера-

туры, например, для холодильника – скорость повышения температуры, когда он не работает, и понижения – когда работает. Об этих параметрах речь пойдет ниже, в разделе, посвященном созданным математическим моделям.

Таблица 1. Таблица температур, внутренних и внешних по отношению к прибору

	Холодильник	Морозильник	Кондиционер/ нагреватель
Внутренняя температура	Температура в камере	Температура в камере	Температура в комнате
Внешняя температура	Температура в комнате	Температура в комнате	Температура на улице
$\Theta^-_{comf}$	0	-25	22
$\Theta^+_{comf}$	6	-18	26

4. Приборы с циклическим режимом работы с возможностью прерывания и возобновления цикла.

К этому подмножеству можно отнести зарядные устройства (например, уже рассматриваемый процесс зарядки ноутбука в течении ночи можно прерывать и возобновлять), принтер (в тех случаях, когда имеется сервер печати и необходимо, например, распечатать определенное число страниц в ночное время) и др. В это подмножество также можно включить и несколько «зависимых» приборов, т.е. приборов, у которых время начала работы одного прибора зависит от времени окончания работы другого.

5. Приборы с несколькими режимами работы.

Это приборы, обладающие возможностью выполнить одну работу в разные промежутки времени с различным энергопотреблением. К этому подмножеству можно отнести как термостатические, так и приборы с циклическим режимом, например: кондиционер и обогреватель, зарядные устройства и другие приборы, имеющие несколько режимов.

В этом случае функциональные требования не изменятся, а к паспортным данным нужно добавить уже перечисленные данные для каждого режима.

Этап 2. Ввод в программу оптимизации необходимых для расчета данных

Существует «проблема входных данных»: с одной стороны, чем более подробные данные будут вводиться в программу по характеристикам приборам, графикам потребления приборов (для оценки суммарной потребляемой мощности) и пр., тем больший выигрыш будет у пользователя от оптимизации; с другой стороны, из-за увеличения объема ввода увеличивается трудоемкость этого процесса, что сокращает количество пользователей программ оптимизации. На трудоемкость влияет не только количество входных данных, но и их состав. Так любой пользователь из технического паспорта прибора может выбрать величину потребляемой мощности, но он не сможет рассчитать и ввести в модель коэффициент теплопередачи процесса теплообмена, так как для этого нужны специальные знания. В то же время значения этого параметра (как будет показано ниже) необходимо для оптимизации работы такого прибора как холодильник.

Исходя из сказанного можно сделать простой вывод: для практического применения методики оптимизации энергопотребления необходимо минимизировать объем вводимых пользователем входных данных и одновременно предоставить пользователю рекомендации для определения значений входных параметров.

Рассмотрим этот вывод на примере [23]. При формализации задачи оптимизации в этой работе для каждого прибора вводится матрица, строки которой определяют все допустимые графики работы прибора. Работа по составлению этой матрицы возлагается на пользователя. Если пользователь начнет вводить данные в программу оптимизации по методике, предлагаемой в [23], то трудоемкость процесса заполнения указанной матрицы будет значительной. Например, для стиральной машины в интервале ее работы 22:00 – 24:00 при десятиминутном интервале оптимизации пользователю придется заполнить нулями и единицами 12 строк этой матрицы.

Ясно, что объем вводимых данных избыточен и в программе оптимизации должен присутствовать модуль, автоматически

переводящий описание функциональных требований в матричное представление.

В [23] приведена методика оптимизации работы кондиционера с установкой диапазона изменения температуры в комнате 22–25 градусов. Для этого прибора представлен алгоритм оптимизации, но не приводится методика определения самих данных.

В некоторых ситуациях описанную выше матрицу допустимых графиков работы прибора невозможно заполнить: одна и та же строка матрицы может быть как допустимой, так и недопустимой, в зависимости от условий, никак не связанных с работой прибора.

Например, пусть необходимо оптимизировать работу стиральной машины и электрической сушилки так, чтобы операции стирки и последующей сушки закончились не позднее 23:00. Тогда строка в матрице, соответствующей сушилке, работа которой начинается в 21:00, будет допустимой, если операция стирки закончится к этому моменту, и недопустимой в обратном случае. В методике [23] не предложен механизм определения допустимости задаваемого пользователем графика работы прибора к условиям задачи.

Этап 3. Расчет графиков работы электроприборов данной группы.

Результатом взаимодействия потребителя и программы оптимизации по приведенной выше схеме является оптимальный набор графиков работы выбранных электроприборов. Под оптимальным набором понимается сумма допустимых графиков всех оптимизируемых приборов, которая достигает оптимума по выбранному критерию или критериям и удовлетворяет некоторым ограничениям. График работы оптимизируемого прибора назовем допустимым, если он удовлетворяет пользователя.

Выполненный анализ показал, что методику оптимизации энергопотребления нужно строить в следующем порядке:

- 1) провести группировку приборов по способу задания функциональных требований;
- 2) выяснить приемлемый для пользователя состав и вид входных данных;

3) определить минимальный набор входных данных для формализации ограничения суммарной потребляемой мощности;

4) сконструировать алгоритмы оптимизации, работающие с указанными выше входными данными.

Это означает, что первичным для практического применения методики оптимизации является вопрос о данных (по оптимизируемым приборам и ограничениям), которые может предоставить пользователь, а алгоритмы оптимизации являются вторичными. Рассмотрим подробно каждый из перечисленных пунктов 1–4.

## *2.2. ОБЩИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ*

Общий подход к решению задачи оптимизации заключается в следующем: весь период, на котором проводится оптимизация, разбивается на равные интервалы (назовем их «интервалы оптимизации»), внутри которых такие переменные модели, как стоимость единицы энергии, суммарное потребление, режимы работы приборов и пр., условно считаются постоянными величинами. Как правило, длительность интервала оптимизации составляет 1–10 минут.

Особенностью рассматриваемой задачи, с точки зрения поиска математического метода ее решения, является значительное количество переменных. Даже для небольшого домохозяйства и длительности оптимизации в несколько суток общее количество ограничений составляет порядка  $10^2$ – $10^4$ . Эффективным методом решения рассматриваемой оптимизационной задачи является метод линейного программирования [3, 4]. Поэтому алгоритм оптимизации проектируется так, чтобы полученные неравенства удовлетворяли условиям задачи линейного целочисленного программирования (ЛП).

Для этого в задачу ЛП вводятся переменные величины, отражающие состояние прибора (работает/не работает) на каждом интервале оптимизации, Постоянные величины, например, мощность прибора или стоимость киловатта в заданном интер-



вале времени, присутствуют в виде коэффициентов в ограничениях и целевой функции.

Наконец, строится целевая функция и ограничения в виде неравенства, описывающие функциональные требования к прибору. В результате этих действий задача сводится к задаче линейного целочисленного программирования.

### *2.3 ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОГРАНИЧЕНИЯ СУММАРНОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ*

Из ранее принятого допущения постоянства общей потребляемой мощности в течение любого интервала оптимизации вытекает ограничение общей потребляемой энергии на этом интервале оптимизации. Тогда при известном максимальном потреблении эта задача сводится к задаче определения функции  $A^-(t)$  – суммарного потребления в течении  $t$ -го интервала оптимизации всех приборов, не входящих в список оптимизируемых приборов. При этом нужно учитывать сформулированное утверждение о минимизации объема входных данных, вводимых пользователем.

Методам определения функции  $A^-(t)$  посвящено немало количество работ. В канонической, активно цитируемой и используемой работе [10] благодаря полной и детальной статистике по приборам и социальному составу жителей исследуемых домохозяйств построена математическая модель (модель «Капассо»), которая с высокой точностью прогнозирует графики потребления электроэнергии как суммарной, так и по отдельным группам приборов. Для РФ подобная статистика отсутствует, поэтому в данной работе предлагается использовать оценку функции  $A^-(t)$  на основе методики расчета суточного профиля нагрузки домохозяйств [1]. Методика построена таким образом, чтобы минимизировать общее количество измерений. Однако в результате обработки данных получается усредненный суточный профиль нагрузки в то время, как для ограничения по суммарной потребляемой мощности нужна оценка максимального суточного профиля. Поэтому потребовалась небольшая модификация методики, заключающаяся в предположении, что значения потребляемой мощности, полученные при измерении,

можно рассматривать как случайную величину, имеющую нормальное распределение. Тогда можно применить правило трех сигм и утверждать, что почти всегда максимальная потребляемая мощность  $A^-(t)$  будет меньше суммы средней мощности и утроенного среднеквадратичного отклонения. С помощью этого утверждения была проведена оценка функции  $A^-(t)$ .

Таким образом, определены все структуры входных данных для программы оптимизации. С одной стороны, каждый из перечисленных параметров является необходимым, без них оптимизацию провести невозможно, а с другой – пользователь без труда сможет определить значение каждого параметра, так как возможно всего 4 варианта:

- значение параметра определяется предпочтениями пользователя (срок окончания программы стирки, диапазон комфортных температур для кондиционера);

- значение параметра можно найти в паспорте прибора (потребляемая мощность, время работы операции). Точность параметров, указанных в паспорте приборов, может быть недостаточной для их использования в предлагаемом методе. В этом случае повышение точности может быть достигнута с использованием современных датчиков и технологий «Интернета вещей»;

- параметры, относящиеся к ограничению максимального потребления, определяются не пользователем, а соответствующими аудиторами, причем, аудит проводится только у нескольких представителей домохозяйств, в среднем составляющей единицы и иногда даже доли процентов [1];

- значения двух параметров для приборов с термостатическим управлением; ниже будет приведена простая (для пользователя) методика их определения.

Перейдем к рассмотрению созданной математической модели и алгоритмам оптимизации энергопотребления.

## 2.4 АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Алгоритм конструируется достаточно стандартным образом: по каждому из рассмотренных подмножеств видов приборов определялся их вклад в целевую функцию и ограничение

по суммарной потребляемой мощности, а также составлялись неравенства, описывающие ограничения, вводимые на переменные и функциональные требования к приборам. Для этого введены переменные, описывающие состояние прибора (вкл/выкл) в течение каждого интервала оптимизации и с их помощью получены все перечисленные выражения (целевой функции как суммарной стоимости потребленной электроэнергии, и т.д.).

Алгоритм допускает расширение системы ограничений, в том числе связанных с безопасностью и надежностью функционирования инженерных сетей.

Рассмотрим особенности в конструировании алгоритма.

1. Приборы с циклическим режимом работы.

Основная трудность моделирования этой группы приборов состоит в преобразовании полученных выражений к задаче линейного программирования. Методику преобразования рассмотрим на простом примере: необходимо оптимизировать работу прибора, цикл которого состоит из трех операций (каждая из которых занимает один интервал оптимизации) в течении шести интервалов оптимизации.

Обозначим  $a_1, a_2, a_3$  – потребление прибора на каждом интервале цикла, а  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$  – стоимости единицы электроэнергии на каждом интервале оптимизации.

Введем четыре оптимизируемых переменных  $e_1, e_2, e_3, e_4 \in \{0, 1\}$ , соответствующих номеру интервала начала работы прибора, следующим способом: если прибор начинает работать с  $l$ -го интервала, то  $e_k = 1, k = l$  и  $e_k = 0, k \neq l$ . Тогда общие ограничения на переменные можно записать следующим образом:

$$(1) \quad \begin{cases} 0 \leq e_1 \leq 1, \\ \dots \\ 0 \leq e_4 \leq 1, \\ e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = 1. \end{cases}$$

Выражение части целевой функции:

$$(2) \quad e_1(c_1a_1 + c_2a_2 + c_3a_3) + e_2(c_2a_1 + c_3a_2 + c_4a_3) + e_3(c_3a_1 + c_4a_2 + c_5a_3) + e_4(c_4a_1 + c_5a_2 + c_6a_3) \rightarrow \min.$$

Выражения по вкладу в общее потребление на  $k$ -м интервале оптимизации  $R(k)$ :

$$(3) \begin{cases} R(1) = e_1 a_1, \\ R(2) = e_1 a_2 + e_2 a_1, \\ R(3) = e_1 a_3 + e_2 a_2 + e_3 a_1, \\ R(4) = e_2 a_3 + e_3 a_2 + e_4 a_1, \\ R(5) = e_3 a_3 + e_4 a_2, \\ R(6) = e_4 a_3. \end{cases}$$

Таким образом, все полученные выражения линейны относительно введенных переменных и удовлетворяют условиям задачи линейного программирования.

## 2. Приборы с термостатическим управлением.

Главная трудность, возникающая при моделировании приборов из этого подмножества, заключается в математическом описании функционального ограничения на температуру внутри прибора: она должна находиться в заданном диапазоне. Для решения этой задачи используется упрощенная математическая модель процесса поддержания внутренней температуры прибора в виде дифференциального уравнения 1-го порядка, которая апробирована на реальных данных и широко используется в исследованиях по энергопотреблению [9].

В [9] показано, что для получения зависимости температуры внутри прибора от графика использования прибора достаточно проверить выполнение неравенства относительно температуры внутри прибора на концах всех интервалов оптимизации.

Полученное выражение для температуры является линейным и удовлетворяет условиям задачи линейного программирования. Также оно содержит два комплексных параметра, описывающих теплоемкость, тепловое сопротивление и коэффициент полезного действия прибора. Для определения значений этих параметров в [2] предложена простая методика: пользователю необходимо провести три измерения внутренней температуры прибора с интервалом, равным интервалу оптимизации при

включенном и выключенном приборе. В этом случае для комнатного обогревателя и величины интервала оптимизации в 10 минут пользователю нужно провести следующие действия:

- измерить температуру в комнате;
- включить обогреватель на 10 минут;
- измерить температуру в комнате;
- выключить обогреватель и измерить температуру в комнате через 10 минут.

Этих измерений достаточно для определения необходимых параметров. С одной стороны, это необходимый минимум измерений, с другой – измерения просты и доступны для пользователя.

Для методики получены выражения для температуры при следующих важных ситуациях использования указанного подмножества приборов:

1. Случай работы прибора в заданных промежутках времени при заданном комфортном диапазоне изменения температуры в помещении.

2. Случай работы нескольких приборов в общей окружающей среде, например, в режиме поддержания температуры в одной комнате несколькими обогревателями.

3. Ситуации, когда внутренняя температура одного прибора является внешней температурой для другого. Например, оптимизация совместной работы холодильника и кондиционера, которые расположены в одном помещении.

3. Приборы с циклическим режимом работы с возможностью прерывать и возобновлять цикл.

При моделировании прибор из этого подмножества представлялся в виде нескольких приборов, цикл работы которых нельзя прерывать.

4. Приборы с несколькими режимами работы.

Приборы из этого подмножества моделировались аналогично приборам с циклическим режимом работы: каждый прибор представлялся в виде нескольких приборов (по количеству режимов работы) и вводилось дополнительное ограничение, запрещающее возможность работы более одного прибора для любого интервала оптимизации.

### 3. Практический пример оптимизации энергопотребления

Работоспособность полученных алгоритмов для различного вида приборов была проверена на упрощенном примере оптимизации работы холодильника и посудомоечной машины (с двумя режимами работы) в течение пяти часов.

При тридцатиминутном интервале оптимизации были составлены выражения целевой функции и неравенств (76 неравенств), описывающие функциональные ограничения приборов и ограничение на максимально потребляемую мощность. Полученные выражения были объединены, переведены в матричный вид и с помощью программы Matlab найдено оптимальное решение поставленной задачи, точнее несколько оптимальных решений. На рис. 1 приведены графики работы приборов в одном из оптимальных вариантов.

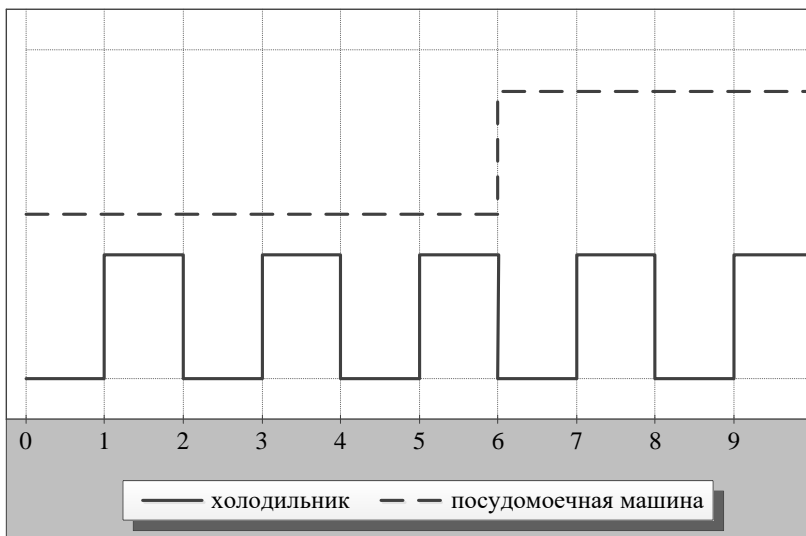


Рис. 1. Графики зависимости работы приборов от номера интервала оптимизации

Верхний график характеризует режимы включения/выключения посудомоечной машины на каждом интервале оптимизации. Нижний график соответствует режимам включения/выключения холодильника.

Анализ полученного решения показал, что при уменьшении интервала оптимизации суммарная стоимость электроэнергии уменьшается (при одновременном повышении точности решения), поэтому при практическом применении значение величины интервала оптимизации нужно задавать меньше, чем в приведенном примере (около 1–5 минут), но так, чтобы решение задачи выполнялось за приемлемое время.

В процессе проводилась оценка экономии путем сравнения стоимости энергопотребления приборов без применения оптимизации и с применением предложенной методики. Для данного примера предложенная методика обеспечивает экономию примерно 11 %.

#### **4. Выводы**

1. При исследовании существующих методов оптимизации энергопотребления в домохозяйствах была выявлена проблема, заключающаяся в сложности применения этих методов на практике.

2. Проведенный анализ позволил сформулировать основные принципы построения методики оптимизации, удобной для практического применения.

3. Для формализации функциональных требований проведено разделение множества различных видов приборов на подмножества, для каждого из которых определена структура входных данных.

4. Разработана методика прогнозирования графика максимальной суммарной мощности.

5. Разработана общая методика, включающая методики оптимизации энергопотребления для каждого из выделенных подмножеств бытовых приборов.

6. Выполнено моделирование полученных алгоритмов оптимизации, которое показало их работоспособность, эффектив-

ность и возможность их практического применения без обучения пользователей специальным навыкам.

### Литература

1. ГРЕБЕНЮК Г.Г., КОВАЛЕВ С.П., КРЫГИН А.А., СЕРЕДА Л.А. *Организация энергоменеджмента и планирование электрической нагрузки домохозяйств // Энергобезопасность и энергосбережение.* – 2015. – №3. – С. 22–27.
2. ГРЕБЕНЮК Г.Г., КРЫГИН А.А. *Оптимизация энергопотребления домохозяйства на основе прогноза графика максимальной нагрузки бытовых приборов // Управление большими системами: сборник трудов.* – 2017. – Вып. 69. – С. 50–75.
3. ЗОРКАЛЬЦЕВ В.И., ФИЛАТОВ А.Ю. *Новые варианты двойственных алгоритмов внутренних точек для систем линейных неравенств // Журнал вычислительной математики и математической физики.* – 2004. – Т. 44, №7. – С. 1234–1243.
4. УСКОВ Е.И. *Численное сравнение оптимизационных алгоритмов // Теоретические и прикладные задачи нелинейного анализа.* – М.: ВЦ РАН, 2012. – С. 118–131.
5. ALBANI M.H., EL-SAADANY E.F. *A summary of demand response in electricity markets // Electric Power Systems Research.* – 2008. – Vol. 11, Iss. 78. – P. 1989–1996.
6. ANN-PIETTE M., GHATIKAR G., KILICCOTE S., WATSON D., KOCH E., HENNAGE D. *Design and operation of an open, interoperable automated demand response infrastructure for commercial buildings // J. Comput. Inf. Sci. Eng.* – June, 2009. – Vol. 9. – P. 1–9.
7. BASHASH S., FATHY HOSAM K. *Modeling and Control Insights into Demand-side Energy Management through Setpoint Control of Thermostatic Loads // American Control Conference, June 29 – July 1, 2011, San Francisco, CA, USA.* – P. 4546–4553.
8. BRADAC Z., KACZMARCZYK V., FIEDLER P. *Optimal scheduling of domestic appliances via MILP // Energies.* – 2015. – Vol. 8, Iss. 1. – P. 217–232.



9. CALLAWAY D.S. *Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy* // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50. – P. 1389–1400.
10. CAPASSO A., GRATTIERI W., LAMEDICA R., PRUDENZI A. *A bottom-up approach to residential load modeling* // IEEE Trans. on Power Systems. – Sept. 1994. – Vol. 2. – P. 957–965.
11. CHAN S.C., TSUI K.M., WU H.C., HOU Y., WU Y.C., WU F. F. *Load / price forecasting and managing demand response for smart grids: Methodologies and challenges* // Signal Processing Magazine. – 2012. – Vol. 29, Iss. 5. – P. 68–85.
12. CONEJO A.J., MORALES J.M., BARINGO L. *Real-time demand response model* // IEEE Trans. on Smart Grid. – 2010. – Vol. 1, Iss. 3. – P. 236–242.
13. FERREIRA R.S., BARROSO L.A.N., CARVALHO M.M. *Demand response models with correlated price data: a robust optimization approach* // App. Energy. – 2012. – Vol. 96. – P. 133–149.
14. GOTTWALT S. *Demand side management – a simulation of household behavior under variable prices* // Energy policy. – 2011. – Vol. 39, Iss. 12. – P. 8163–8174.
15. GREBENYUK G.G., SOLOV'EV M.M. *Continuous Price Regulation to Form the Desired Load Schedule of a Power System* // Automation and Remote Control – 2004. – Vol.65, No. 5. – P. 834–839.
16. LI B. *Predicting user comfort level using machine learning for smart grid environments* // Innovative Smart Grid Technologies. – 2011. – P. 1–6.
17. LI N., LIJUN CHEN, LOW S. *Optimal demand response based on utility maximization in power networks* // Proc. of the IEEE Power & Energy Society General Meeting. – 2011. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039082> (дата обращения: 25.02.2021).
18. LUJANO-ROJAS J.M. *Optimum residential load management strategy for real time pricing demand response programs* // Energy policy. – 2012. – Vol. 45. – P. 671–679.

19. MOHSENIAN-RAD A.H., LEON-GARCIA A. *Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments* // IEEE Trans. on Smart Grid. – 2010. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 120–133.
20. PEDRASA M.A.A., SPOONER T.D., MAXGILL I.F. *Scheduling of demand side resources using binary particle swarm optimization* // IEEE Trans. on Power Systems. – 2009. – Vol. 24, №3. – P. 1173–1181.
21. RAMANATHAN B., VITTAL V. *A framework for evaluation of advanced direct load control with minimum disruption* // IEEE Trans. on Power Systems. – 2008. – Vol. 23, Iss. 4. – P. 1681–1688.
22. SOU K.C. *Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming* // 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC2011). – P. 5144–5149.
23. VOLKOVA I.O., GUBKO M.V., SALNIKOVA E.A. *Active consumer: optimization problems of power consumption and self-generation* // Automation and Remote Control. – 2014. – Vol. 75, Iss. 3. – P. 551–562.
24. ZIEGENFUS S. *Demand Response And Light Control* // ASHRAE Journal. – 2012. – November. – P. B20–B24.

## MODELS, METHODS AND PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN HOUSEHOLDS

**Georgy Grebenuk**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, chief researcher (gggrebenuk@gmail.com).

**Andrey Krygin**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand. Sc., senior researcher (andreyakr14@gmail.com).

**Leonid Sereda**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher (sereda@lab49.ru).

*Abstract: An approach to optimizing energy consumption in households is considered, which makes it possible to reduce the labor intensity of calculations by active consumers of economically beneficial modes of household appliances. On the basis*

*of the analysis of the applied methods of optimization of energy consumption modes, the reasons limiting the use of these methods in the practice of households are revealed. One is the availability of data on optimized appliances and constraints. The formalization of the requirements for the modes of use of household appliances with cyclic, thermostatic and combined modes of operation has been completed. The features of the formation of constraints in the problem of linear programming are shown and a methodology for optimizing the modes is proposed, which is available due to labor intensity to an active consumer. The results of modeling are presented, confirming the effectiveness of the proposed method.*

Keywords: energy efficiency, energy management, household.

УДК 620.9:502.174

ББК 78.34

DOI: 10.25728/ubs.2021.93.3

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.*

*Поступила в редакцию 04.08.2021.*

*Опубликована 30.09.2021.*