**Авторский перевод: Нерсисян А.С.**

# **Реалистичное моделирование поведения пользователей для энергосбережения в жилых домах**

Хорхе Мартинес-Хиль, Георгиос Чапарис,

Бернхард Фройденталер, Томас Начлэгер

Центр компетенции в области программного обеспечения

(Software Competence Center Hagenberg GmbH)

Softwarepark 21, 4232 Hagenberg, Austria

**Аннотация.** Из-за высокой стоимости живых исследований моделирование производительности стало широко распространенным методом оценки качества предлагаемых решений в этой области. Кроме того, возможность имитировать поведение будущих обитателей жилого дома может быть очень полезной, поскольку она может поддерживать решения как во время проектирования, так и во время выполнения, что приводит к снижению энергопотребления, например, путем разработки контроллеров с прогнозированием модели, которые включают прогнозы поведения пользователей. В этой работе мы предоставляем основу для моделирования поведения пользователей в жилых домах. Фактически, нас интересует, как справиться со всеми аспектами поведения пользователей, чтобы эти компьютерные симуляции могли обеспечить реалистичную основу для тестирования альтернативных политик энергосбережения.

**Ключевые слова** - поведение пользователей; потребление энергии; сохранение энергии

## **ВВЕДЕНИЕ**

Традиционные методы оптимизации энергопотребления не учитывают изучение недетерминированной природы человеческого поведения при предоставлении решений в этой области, но постепенно появляются новые человекоцентричные парадигмы. Это означает, что новые подходы, ориентированные на человека, в настоящее время находятся в стадии интенсивных исследований и разработок. Таким образом, и в основном из-за высокой стоимости живых исследований в этой области, моделирование производительности с помощью компьютеров кажется подходящим и дешевым методом для точной оценки качества этих новых подходов.

Нашу идею разделяет сообщество. Например, моделирование здания с помощью компьютеров очень важно, поскольку каждое здание отличается во многих отношениях [3], [4], например, в отношении местоположения и внешней среды, типа конструкции и оболочки здания, использования пространства и внутренней среды, система отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) и так далее. Мы считаем, что моделирование поведения пользователя также является важным аспектом моделирования здания, поскольку а) пользователи влияют на общий приток тепла в комнате, и б) цели уровня комфорта могут быть достигнуты только в присутствии людей. Таким образом, реалистичное моделирование и прогнозирование поведения пользователя могут значительно способствовать экономии энергии. По нашему мнению, моделирование, которое не может учитывать это присутствие и тепловые изменения, не может считаться достаточно реалистичным, чтобы делать точные выводы.

Это то, что происходит в большинстве существующих подходов: случайные процессы, определяемые поведением человека, такие как управление освещением, занятость, выполняемые действия и т.д., вынуждены работать по фиксированному расписанию или в соответствии с правилами управления, аналогичными последовательностям, которые запускают механические системы, задействованы такие как жалюзи, окна и тд. Это компромисс между сильными сторонами программных инструментов, предназначенных для моделирования зданий, и предсказуемыми механическими средствами управления. Однако мы знаем, что в реальных зданиях решения по ручному управлению могут существенно отличаться от того, что диктуют эти упрощенные модели. До сих пор этой области исследований уделялось мало внимания. Согласно Oldewurtel и др. [9], основная причина того, что до сих пор редко проводились исследования реалистичного поведения пользователей, — это в первую очередь трудности и затраты на получение точной модели, а также тот факт, что затраты на энергию играли незначительную роль в прошлом. Но сейчас ситуация иная.

Мы стремимся предоставить основу для моделирования поведения пользователей в жилых зданиях, которую можно использовать в качестве инструмента проектирования и тестирования для эффективного управления энергопотреблением. Фактически, мы особенно заинтересованы в том, чтобы учесть все аспекты, касающиеся поведения пользователей (присутствие людей в разных комнатах, выполняемые действия, использование света и электрических устройств, естественная вентиляция, использование горячей воды для бытового потребления и т.д.), чтобы действительно реалистичные сценарии могут быть воспроизведены в компьютерном симуляторе. Такая структура моделирования полезна как в качестве инструмента проектирования (например, для включения прогнозов поведения пользователя в предсказательные контроллеры модели), так и в качестве инструмента тестирования (например, для тестирования производительности альтернативных контроллеров нагрева в реалистичных сценариях).

Остальная часть этого документа структурирована следующим образом: Раздел II представляет соответствующую работу по управлению энергетическими данными, касающимися поведения пользователей в жилых зданиях. Раздел III описывает наше предложение по моделированию поведения пользователей со стохастической точки зрения. В Разделе IV мы объясняем, как мы построили наши модели поведения пользователей для моделирования реалистичных сценариев. В Разделе V мы оцениваем пользу прогнозов для экономии энергии. Наконец, в разделе VI представлены заключительные замечания и будущая работа.

## **СВЯЗАННЫЕ РАБОТЫ**

Согласно предыдущим исследованиям, существует два основных пути решения проблемы экономии энергии в современных зданиях. Первый из них в значительной степени зависит от вмешательства человека, поскольку он предлагает ручное управление, основанное исключительно на обратной связи по потреблению от коммунальных предприятий, домашних систем и т.д. Второй способ не зависит от людей, так как пытается автоматически контролировать здания, отслеживая и контролируя их потребление энергии.

Один из стандартных подходов к управлению энергопотреблением включает моделирование контроллеров с прогнозированием. Однако прогнозы поведения пользователей обычно не входят в состав таких формулировок [7]. Мы думаем, что включение некоторых моделей, касающихся привычек жителей дома, может улучшить существующие стратегии прогнозирования. Наше мнение основано на многих работах, таких как: Wood & Newbotough [12] добились хорошего процента снижения энергопотребления жильцов за счет изменения их поведения. Hoes и др. [4] показывают, что потребление электроэнергии в зданиях связано не только с их эксплуатационными характеристиками и характеристиками использования пространства, но и с поведением их жителей. Yu и др. [13] попытались определить влияние поведения жильцов на потребление энергии в здании. Полученные результаты подсказывают, как расставить приоритеты при изменении поведения пользователей с целью снижения затрат. Риджал и др. [11] предложили модель, которая была разработана, чтобы включить взаимодействие среднего пользователя офисного помещения с хорошими результатами. Буржуа [1] обнаружил, что реалистичный подход к управлению осветительным устройством может привести к значительному сокращению использования энергии. Оуян и Хокао [10] исследовали потенциал энергосбережения за счет улучшения поведения пользователей в 124 домах в Китае, полученные результаты показали, что эффективное продвижение энергосберегающего поведения может снизить потребление энергии. Наконец, некоторые пилотные проекты продемонстрировали, что системы с низким энергопотреблением, такие как естественная вентиляция, затенение для контроля притока солнечного тепла и бликов, дневное освещение для приглушенного света и требующая контролируемой вентиляции, особенно нуждаются во взаимодействии и сотрудничестве со стороны жителей [5].

До сих пор не во многих решениях по энергосбережению рассматривалось использование поведенческой информации от жильцов дома, но есть множество других факторов, которые можно принять во внимание для повышения энергоэффективности. Некоторые из этих факторов являются фиксированными, а некоторые - динамическими. Фиксированные коэффициенты можно собрать заранее, просто спросив жильцов. Затем эксперты могут предложить лучшие способы их использования. Существует три основные группы факторов: связанные с размещением в доме, связанные с жильцами и характером подсистем дома. Что касается динамических факторов, мы можем упомянуть большинство физических условий, то есть характеристики дома, сезонную статистику, прогнозы погоды и так далее. В этой работе мы стремимся включить новый фактор в группу этих динамических аспектов, то есть модели поведения пользователей, которые могут позволить моделировать реалистичные сценарии.

## **СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ**

В настоящее время традиционные подходы к управлению жилыми зданиями доведены до предела из-за новых и очень требовательных строительных технологий. Одно из возможных решений связано с появлением новой парадигмы применения интеллектуальных технологий в жилых домах, часто называемой домашней автоматизацией [8]. Большая часть соответствующей работы сосредоточена на методологиях прогнозирующего управления модели для управления, например, охлаждением, электрическими устройствами, отоплением, освещением и вентиляцией в независимых зонах здания. Чтобы быть более формальным, мы можем сказать, что контроллеры с прогнозированием модели используют модель для прогнозирования будущего развития подсистем корпуса и вычисления оптимальных управляющих действий путем оптимизации функции затрат (связанной с энергосбережением, комфортом и безопасностью в данном случае) в зависимости от этих факторов. предсказания. В ближайшем будущем прогнозирующий контроль модели должен стать еще более важным для обеспечения эффективной и правильной работы здания. Например, поскольку предполагается, что температура наружного воздуха является влиятельным фактором для подсистемы отопления здания, прогнозный контроллер модели может использовать какой-то прогноз погоды для автоматической регулировки температуры в помещении.

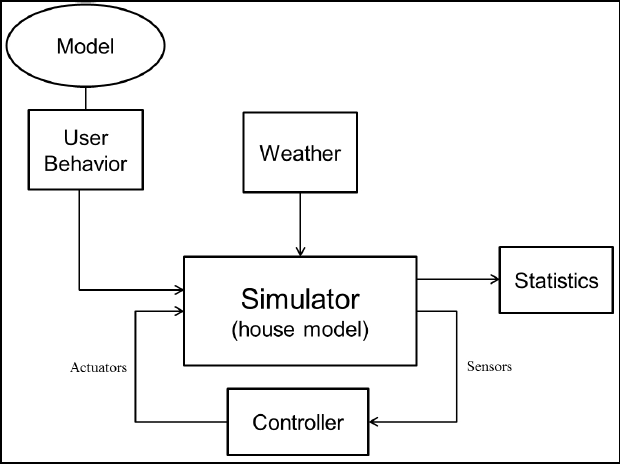


Рисунок 1. Пример сценария моделирования, предназначенного для проверки возможных выгод от использования данной стратегии управления. Если не учитывать поведение пользователя, симуляцию нельзя будет считать реалистичной.

Однако затраты на живые исследования очень высоки, поэтому исследователи заранее тестируют свои стратегии с помощью симулятора. Если результаты этого моделирования кажутся многообещающими, то эти стратегии можно реализовать в реальном мире. Для проведения моделирования исследователи должны учитывать домашние тренажеры, отвечающие их требованиям.

На рисунке 1 показан сценарий моделирования, предназначенный для проверки возможных преимуществ использования данной стратегии управления. Если не принимать во внимание реальные погодные данные или поведение пользователя, моделирование нельзя считать реалистичным. Большинство ранее разработанных симуляторов включают возможности работы с прошлыми погодными данными или даже с прогнозами погоды в будущем. Большинство из них также включают в себя возможности моделирования поведения пользователей. Однако, как мы уже упоминали, эти модели довольно статичны, то есть основаны на фиксированных поведенческих паттернах. Вместо этого в этой статье мы принимаем во внимание недетерминированную природу человеческого поведения, чтобы моделирование могло более точно отражать происходящее в реальном мире.

Новые эмпирические модели поведения пользователей обычно основываются на статистических алгоритмах, которые предсказывают вероятность события, например: открытие окна при определенных условиях окружающей среды. Наша стратегия моделирования основана на наблюдениях за реальной окружающей средой в реальных зданиях, которые позволяют статистическую корреляцию между действиями и человеком, который их выполняет, временем дня, временем года, условиями в помещении и т.д. Другими словами, мы рассматриваем поведение пользователей в жилом доме как стохастический (то есть вероятностный) процесс, в котором вероятность событий основана на нескольких факторах. Например, если мы замечаем, что человек просыпается в 7 утра в рабочий день, наша модель предполагает, что эта закономерность будет происходить регулярно, и добавляет некоторые стохастические изменения в зависимости от коэффициента случайности. Конечно, этот шаблон действителен только для рабочего дня, а не для выходных или праздников.

## **ЭФФЕКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ СЦЕНАРИЕВ**

Учет поведения пользователей при моделировании потребления энергии важен, поскольку люди, живущие в доме, производят внутренние нагрузки в результате своей деятельности. Это означает, что, если эти внутренние нагрузки не принимаются во внимание, выполненное моделирование не может считаться реалистичным. Таким образом, внутренние нагрузки — это те факторы, которые из-за поведения пользователя могут повлиять на динамику дома. Внутренние нагрузки включают, помимо прочего: присутствие пользователя, активность пользователя, использование электроприборов, использование освещения, естественную вентиляцию и использование горячей воды для бытового потребления. Такие внутренние нагрузки можно моделировать с помощью графиков. Расписания — это способ указать, сколько или много из определенного количества присутствует или на каком уровне должна быть установлена ​​физическая переменная. Для проведения моделирования мы собираемся использовать два основных программных инструмента: EnergyPlus [15], Виртуальный испытательный стенд Building Controls (BCVTB) [14] и Matlab. Предлагаемая нами стратегия состоит из 9 шагов. Мы исключаем из этого списка моделирование дома, поскольку мы предполагаем, что у пользователя есть реалистичная модель дома, в котором будет выполняться моделирование. Эти шаги будут объяснены более подробно в следующих подразделах.

### *А. Подготовка структур данных*

Прежде всего, необходимо подготовить структуры данных, которые мы собираемся использовать для работы с данными в основной памяти. Нам нужны структуры данных для хранения и работы со значениями, представляющими присутствие людей в каждой из комнат дома, активность людей в каждой комнате, процент света, который включается на каждом временном шаге, процент электроэнергии, которая присутствует на каждой из них, шаг по времени, перечень открываний / закрываний окон в течение дня и использование горячей воды (посудомоечная машина, душ, стиральная машина и т. д.).

### *Б. Автоматический захват временного шага*

Шаг по времени автоматически берется из модели дома. Это означает, что все данные контроллера должны быть автоматически скорректированы. Мы готовы работать с временными шагами от 1 часа до 1 минуты. Это значение зависит от степени разрешающей способности, которую хотят исследователи для своих стратегий.

### *C. Определение коэффициента случайности*

Одна из основных характеристик поведения пользователя - его непредсказуемость. Однако мы допускаем закономерности в действиях, совершаемых людьми при определенных обстоятельствах. По этой причине нам необходимо работать с коэффициентом случайности, который позволяет системам изменять модели людей, живущих в доме.

### *D. Входные параметры*

Необходимо определить параметры контроллера, то есть управляющие сигналы для управления исполнительными механизмами. Эта задача кажется тривиальной, но на самом деле она очень утомительна при выполнении ее вручную: необходимо определить параметры, которые должны быть отправлены в контроллер, определить параметры, которые должны быть получены в симуляторе, и определить характер значения, которые будут передаваться с использованием среды BCVTB. По этой причине мы автоматизировали эту задачу, чтобы пользователям нужно было определить эти параметры только один раз.

### *E. Выходные параметры*

Важно определить выходные параметры, которые контроллер будет считывать с симулятора, то есть датчики, которые контролируют физическое состояние дома и окружающей среды. Проблема аналогична проблеме с входными параметрами. Это означает, что необходимо отслеживать параметры в симуляторе, чтобы определить параметр, который будет считывать контроллер, и характер данных, которые будут передаваться с использованием среды BCVTB. По этой причине мы также автоматизировали этот процесс. Теперь можно определить выходные параметры только один раз. Программная процедура соответственно обновит эту информацию в остальных модулях.

### *F. Преобразование пользовательского расписания в физические векторы*

Мониторинг поведения жильцов вместе с изменениями в доме является важной задачей при использовании систем, распознающих человека. Этот процесс мониторинга отвечает за сбор соответствующей контекстной информации для систем распознавания активности и пытается угадать, какой вид активности происходит. Однако симулятор не принимает события, описанные на естественном языке. Это означает, что преобразование реальных пользовательских расписаний в физические векторы имеет жизненно важное значение для правильного моделирования действительно реалистичных сценариев. Идея проста: люди дают нам исчерпывающий список своей деятельности дома, мы извлекаем модели поведения и на основе этих моделей автоматически обрабатываем этот список и преобразуем в физические ценности. Этот список должен описывать действия очень точно: день и дата, когда эти действия были выполнены, люди (возраст, пол), которые их выполняли, комнаты, в которых эти действия выполнялись, освещение или электрические устройства, которые поддерживали их, и так далее. Мы используем таблицы преобразования для создания физических векторов. Например, предполагается, что спящий человек выделяет меньше тепла, чем человек, который делает какие-то упражнения. Или воздействие человека, использующего духовку, будет полностью отличаться от воздействия человека, слушающего радио.

### *G. Учет официальных / неофициальных праздников*

Необходимо определить праздничные дни, чтобы учесть эффект отключения дома в определенные периоды года. Определенные таким образом праздничные дни используются для всего моделирования. Можно использовать внешний файл для указания официальных и неофициальных праздников, которые должен учитывать наш фреймворк. Возможные даты выходных определены в расписании выходных, а фактические выходные дни, которые будут использоваться при моделировании.

### *H. Получение значений и интерполяция.*

Значения всегда указываются в форме одного значения в час, то есть вектора из 24 числовых значений. Однако при внутренней работе с этими значениями необходимо адаптировать их к требуемой степени детализации. Причина в том, что иногда пользователи могут захотеть визуализировать статистику с разным уровнем детализации. Для правильного выполнения моделирования необходимо синхронизировать контроллер, среду для передачи данных и симулятор. Этого можно добиться путем интерполяции текущих значений. Поскольку симулятор работает со средними значениями, интерполяция значений не имеет отрицательного эффекта.

### *I. Представление и получение ценностей*

Последний шаг включает отправку/получение значений в/из симулятора из/в контроллер. Этот процесс выполняется с помощью сокетов. Необходимо указать природу значений, которые будут передаваться в трех разных местах: контроллер, симулятор и среда, которая будет использоваться для передачи этих значений. Также необходимо определить тип дня, который мы моделируем, поскольку поведение человека в течение рабочего дня не будет таким же, как в выходные или праздничные дни. Мы разработали наше решение таким образом, что необходимо указывать эти значения только в одном месте. Затем процедура обновит необходимую информацию в других местах соответственно. Очевидно, этот шаг необходимо повторять итеративно до конца моделирования.

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

После разработки структуры для реалистичного моделирования поведения пользователей возникает следующий вопрос: как прогнозы, основанные на таких смоделированных данных о поведении пользователей, могут улучшить энергосбережение в жилых зданиях. Чтобы оценить потенциальную пользу прогнозов поведения пользователей для экономии энергии, мы разработали контроллеры для радиаторных систем отопления, которые могут включать в себя прогнозы поведения пользователей. Разработанные контроллеры вписываются в общую структуру управления с прогнозированием модели (MPC) [6], где периодически (например, каждые час) контроллер оптимизирует использование нагревателя в течение периода оптимизации (например, часов) , в то время как только небольшая часть полученной оптимальной политики реализуется каждый раз (например, политика, соответствующая первому 1 часу). Каждый раз, когда контроллер оптимизирует (например, время ), он собирает измерения наблюдаемых явлений (например, температуры в помещении и на улице, присутствия людей и т. Д.) И обновляет свои прогнозы относительно эволюции этих явлений (например, изменение температуры в помещении и будущая занятость). Таким образом, реализация MPC обеспечивает механизм обратной связи для исправления / улучшения потенциально неточных прогнозов.

Мы реализовали стандартную структуру MPC для контроля температуры отдельной тепловой зоны в типичном жилом доме. Реализация была возможна в среде моделирования EnergyPlus [15], где изменение температуры в помещении можно было наблюдать при различных стратегиях управления отоплением. Контроллер разработан таким образом, чтобы минимизировать взвешенную сумму стоимости тепловой энергии и стоимости комфорта (определяемой как евклидово расстояние комнатной температуры от желаемой температуры ) на горизонте оптимизации .

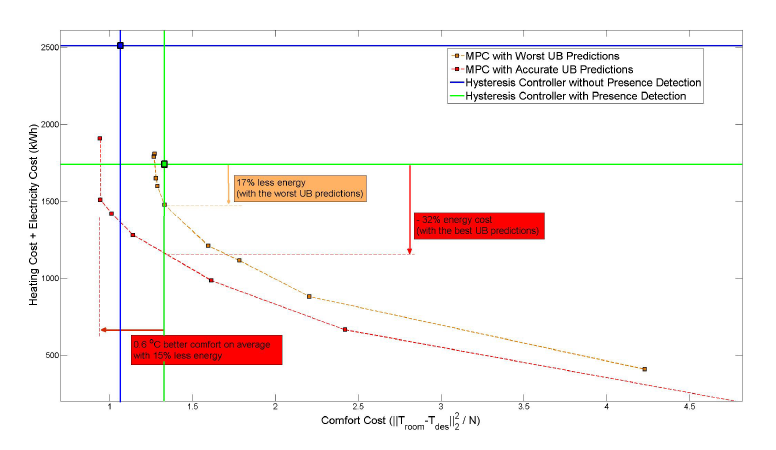


Рисунок 2. Сравнение стоимости энергии в зависимости от уровня комфорта для различных контроллеров.

На рисунке 2 показаны два разных эксперимента по ПДК, проведенных в течение двух месяцев (октябрь-ноябрь в Линце, Австрия). В первом из них текущие измерения занятости используются в качестве прогнозов для всего горизонта оптимизации (худшие прогнозы), а во втором используются точные прогнозы занятости. Таким образом, эти два эксперимента устанавливают границы в отношении преимуществ, полученных от включения прогнозов поведения пользователей. Для обоих экспериментов стоимость теплового комфорта была нанесена на график для различных масштабных коэффициентов комфорта. Наконец, в обоих экспериментах контроллер использует точные прогнозы погоды и определенную модель изменения комнатной температуры. Таким образом, эта настройка позволяет нам оценить пользу прогнозов поведения пользователей в области энергосбережения.

Также показаны соответствующие затраты на стандартные контроллеры гистерезиса (то есть тот, который работает только в присутствии людей, и тот, который всегда включен). Обратите внимание, что включение точных прогнозов занятости может привести к снижению общих затрат на отопление до при уровне комфорта, соответствующем стандартному контроллеру гистерезиса. Энергия также сохраняется даже без точных прогнозов поведения пользователя благодаря остальным прогнозам, включенным в прогнозирующий контроллер модели (то есть прогнозам погоды и температуры в помещении).

## **ВЫВОД**

Поведение пользователей является одним из наиболее значительных источников неопределенности при прогнозировании использования энергии в зданиях с помощью программ моделирования из-за сложности и неотъемлемой неопределенности поведения людей. В связи с тенденцией к использованию интеллектуальных контроллеров, которые снижают потребление энергии, учет поведения активно вовлеченных жителей дома является ключом к достижению реалистичного моделирования, ведущего к получению решений для высоких энергетических характеристик без ущерба для комфорта или производительности жильцов. В этой работе мы представили наши текущие исследования по моделированию поведения пользователей для моделирования реалистичных сценариев, ведущих к оптимизации энергопотребления. Фактически, мы постарались учесть все аспекты, касающиеся поведения пользователей (присутствие, действия, использование освещения и электрических устройств, естественная вентиляция, использование горячей воды для бытового потребления и т.д.), чтобы можно было воспроизвести действительно реалистичные сценарии в компьютерный тренажер. Таким образом можно проводить точные исследования, но без больших затрат на исследования в реальном времени.

## **ПРИЗНАНИЕ**

Эта работа финансировался Региональным агентством по конкурентоспособности Верхней Австрии 2007-2013 из Европейского фонда регионального развития и штата Верхняя Австрия.

## **ИСТОЧНИКИ**

[1] D. Bourgeois. Detailed occupancy prediction, occupancysensing control and advanced behavioural modelling within whole-building energy simulation, Ph.D. Thesis. Universite Laval, Quebec, 2005.

[2] S. Ghaemi, G. Brauner. User behavior and patterns of electricity use for energy saving. IEWT2009.

[3] O. Guerra Santin. Behavioural Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating. Energy and Buildings 43: 2662-2672, (2011) .

[4] P. Hoes, J.L.M. Hensen, M.G.L.C. Loomans, B. de Vries, D. Bourgeois. User behavior in whole building simulation. Energy and Buildings 41(3): 295-302, (2009).

[5] A. Mahdavi, L. Lambeva, A. Mohammadi, E. Kabir, C. Proglhof. Two case studies on user interactions with buildings environmental systems. Bauphysik 29(1): 72-75, (2007).

[6] D. Q. Mayne and J. B. Rawlings and C.V. Rao and P. O. M. Scokaert, Constrained model predictive control: Stability and Optimality, Automatica 36: 789-814, 2010.

[7] J. Martinez-Gil, B. Freudenthaler, T. Natschlaeger. Modeling user behavior through electricity consumption patterns. 24th International Workshop on Database and Expert Systems Applications: 204-213, 2013.

[8] J.F. Nicol. Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. Proceedings of Building Simulation, Rio de Janeiro, Brazil, 1073-1078, (2001).

[9] F. Oldewurtel, A. Parisio, C.N. Jones, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann, M. Morari. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. Energy and Buildings 45: 15-27, (2012).

[10] J. Ouyang, K. Hokao. Energy-saving potential by improving occupants behavior in urban residential sector in Hangzhou City, China. Energy and Buildings 41(7): 711-720, (2009).

[11] H.B. Rijal, P. Tuohy, M.A. Humphreys, J.F. Nicol, A. Samuel, J. Clarke. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. Energy and Buildings 39(7): 823-836, (2007).

[12] G.Wood, M.Newbotough. Dynamic energy consumption indicators for domestic appliances: environmental, behaviour and design. Energy and buildings 35: 821-841, (2003).

[13] Z. Yu, B.C.M. Fung, F. Haghighat, H. Yoshino, E. Morofsky. A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption. Energy and Buildings 43(6): 1409-1417, (2011).

[14] BCVTB, https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb.

[15] Energy Plus, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/.