

© 2012 г. А.П. ДАВЫДОВА,
С.А. ЛУПИН, канд. техн. наук

(Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва, Зеленоград)

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЬЮ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

На примере сети зарядных станций для электромобилей, в работе рассмотрен подход к оценке устойчивости систем управления, основанный на использовании методов имитационного моделирования.

STABILITY EVALUATION OF CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS NETWORK / A.P. Davydova, S.A. Lupin (National Research University "MIET", Moscow, Zelenograd, passage 4806, building 5. E-mail: netadm@miee.ru). With the help of the example of electric vehicle charging stations network the approach for stability evaluation of control systems is examined in this paper. The approach is based on using the simulation methods.

1. Введение

В современной жизни человека окружают различные сложные технические системы, обеспечивающие удовлетворение его потребностей. Управление такими системами невозможно без использования средств автоматизации. Поскольку мы передаем автоматике все больше областей, как в быту, так и на производстве, актуальной является задача построения устройств управления устойчивых как к изменению нагрузки, так и к недостоверной информации. Доминирующей тенденцией в этом процессе является повышение интеллектуальности систем управления (СУ) и замена человека автоматом в контуре управления. Это становится возможным только в том случае, если автоматическая система управления обеспечивает функционирование объекта во всем диапазоне параметров. В общем случае анализ алгоритмов, лежащих в основе работы СУ, является сложной задачей, для решения которой сегодня могут быть использованы современные параллельные вычислители.

В качестве примера использования предлагаемого подхода в работе рассматривается проблема анализа устойчивости иерархической СУ, состоящей из контроллеров различного уровня, управляющих зарядкой электромобилей (EV - Electrical Vehicle). Каждый контроллер управляет соединением электрической сети с некоторым количеством пунктов зарядки электромобилей, при условии недетерминированности поведения их владельцев. Рост интереса потребителей к EV напрямую связан с исчерпаемостью запасов ископаемого топлива, экологическими проблемами - загрязнением окружающей среды вредными выбросами в атмосферу и парниковым эффектом. Считается, что в обозримом будущем именно перспективные виды электромобилей и использование регенеративных источников энергии позволят улучшить экологию, особенно в мегаполисах.

2. Интеллектуальные сети распределения электроэнергии

Несмотря на очевидные недостатки EV (меньшая мощность и дистанция), учитывая остроту экологических проблем, возможно, что в ближайшем будущем пользователи согласятся поступиться мощностью своих автомобилей и принять неудобства, связанные с длительностью зарядки батарей электромобилей. Однако необходимо заметить, что этот план не осуществим без поддержки государства, поскольку для зарядки электромобилей необходима развитая инфраструктура заправок, и эта функция должна быть доступной как дома, так и в публичных местах (на автомобильных парковках, у супермаркетов, вдоль дорог и т.д.). Только массовый переход автомобилей на электрическую тягу обеспечит существенное сокращение выбросов парниковых газов.

Однако на пути такого решения стоят несколько очень важных проблем, одной из которых является дополнительная нагрузка на сеть, создаваемая EV, в случае их широкого распространения на рынке. Очевидно, что для зарядки такого мощного устройства как электромобиль из сети, требуется большое количество электроэнергии, которое сравнимо с общим количеством электроэнергии, потребляемым всеми электроприборами, используемыми одной семьей [1].

При неконтролируемой стратегии зарядки EV для того, чтобы обеспечить необходимую мощность сети, потребуются дополнительные генераторы, если все электромобили будут заряжаться вечером, или же усиление существующих. Специалисты из Pacific Northwest National Laboratory оценивают долю рынка США, которую может обслужить существующая энергосистема в 84% [2]. Однако для России этот процент будет гораздо ниже и поскольку существующая ситуация заставляет серьезно задуматься об альтернативных источниках энергии для транспорта, то необходимо будет серьезно изменить существующую электросеть. Причем эти изменения потребуют не только увеличения мощности генераторов, но также создания интеллектуальных систем контроля. Увеличение нагрузки и сложность предсказания ее распределения во времени (выбор времени зарядки целиком зависит от владельца транспортного средства, от его привычек и графика дня, и повлиять на это весьма трудно) приведут к пиковым нагрузкам на сеть, повысят вероятность превышения максимально возможной мощности для распределяющего трансформатора.

Однако, рассматривая пути использования более чистых технологий для транспорта, не стоит забывать альтернативные источники электроэнергии - ветрогенераторы, солнечные батареи и т.д. Помимо этого в последнее время появилась технология V2G (Vehicle to Grid), позволяющая использовать транспортные средства как источники энергии. Эта технология особенно эффективна в критических ситуациях перебоев в энергоснабжении, когда, к примеру, больница оказывается отключенной от питания и в этих условиях некоторое устройство управления может разослать запрос своим клиентам, чтобы они предоставили электроэнергию - то есть работали уже не как потребители, а как генераторы энергии. Все это приводит к тому, что традиционная электрическая сеть существенным образом изменяется и превращается в сеть с распределенными генераторами энергии. Это намного усложняет ее структуру и повышает недетерминированность поведения в различных ситуациях.

Вышеперечисленные изменения и обрисованные проблемы в области энергетики, экологии и добычи топлива постепенно приводят к изменению классической структуры электрической сети. Эти изменения обоснованы не только новыми видами генераторов электроэнергии и их распределенной природе, но так же и новыми видами потребителей. Для того чтобы соответствовать современным тенденциям и решать поставленные

перед энергетикой задачи электросеть должна иметь в своем составе множество генераторов энергии имеющих различную природу, как классических, так и альтернативных, функционирование которых подчиняется некоторым не зависящим от человека обстоятельствам - сила ветра, мощность солнечного излучения и т.д. Потребителями являются как стандартные жилые дома, предприятия, так и новые - электромобили, создание и потребность в использовании которых продиктованы необходимостью снизить количество выбрасываемых в атмосферу вредных веществ. Новые транспортные средства EV также требуют значительного видоизменения систем энергоснабжения, в силу своей энергоемкости. Помимо этого, направление передачи энергии в такой сети становится двунаправленным, так как в некоторых ситуациях возможен запрос от основной сети к распределенной сети электрических носителей на выдачи энергии.

Энергосистема должна уметь приспосабливаться и адаптироваться к таким изменениям, иначе говоря, считается, что будущее именно за интеллектуальными системами управления энергосистемами. В 2007 году 110м Конгрессом США был выпущен Акт об энергетической независимости и безопасности (EISA07) [3], в котором были определены десять пунктов, определяющих развитие интеллектуальных распределенных энергетических систем, включающие в себя динамическую оптимизацию сетевых операций и исследований, развитие и интеграцию распределенных источников энергии (особенно источников возобновляемой энергии), внедрение интеллектуальных технологий для измерения, связи и автоматизации, а также использование технологий для сглаживания пиков нагрузки. По мнению Н.Е. Brown и S. Suryanarayanan [4], анализируя EISA07, можно выделить 8 основных концепций интеллектуальной сети: распределенные источники энергии и сглаживание пиков нагрузки, реагирование на спрос электроэнергии, самовосстановление сети, зондирование, потребительские устройства, оптимизация распределенных ресурсов, локальная обработка запросов и продвинутые инструменты (рис.1).

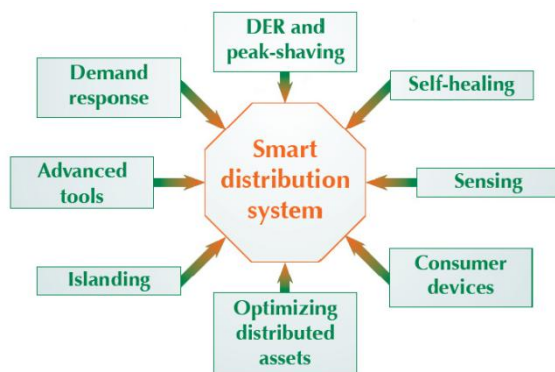


Рис. 1. Основные концепции интеллектуального распределения энергии в сети

Построение и анализ устойчивости алгоритма управления заправочными станциями для электромобилей является подзадачей создания необходимой "умной" сети.

3. Задача оценки устойчивости алгоритма управления территориально распределенными станциями подзарядки электромобилей

Рассмотрим задачу анализа устойчивости алгоритма управления сетью заправок. Будем исходить из предположения, что датчики, работающие на каждой заправочной станции и являющиеся источниками входной информации для центрального контроллера, вырабатывающего управляющее решение для сети заправок станций, могут вы-

ходить из строя и давать ложные данные. Для оценки устойчивости алгоритма управления, т.е. его способности предотвращать перегрузку питающей электросети, необходимо проверить его корректную работу в случае поступления на вход искаженных данных. Это могут быть и показания, которые не возникают в реальной жизни, однако могут выдаваться датчиками в случае их неисправности. Учет неисправности датчиков при оценке устойчивости ведет к факториальному увеличению сложности задачи.

Поскольку управление описанной распределенной структурой обеспечивается командными устройствами сети - контроллерами, то алгоритм управления сетью заправок станций может варьироваться степенью иерархичности системы контроллеров, принимающих управляющие решения и функциями, которые им отводятся. В общем случае структура управляющих узлов может быть как одноранговой, так и иметь сложную иерархию.

Для управления такой сложной иерархической системой, необходимо обеспечить взаимодействие между ее узлами, чтобы повысить интеллектуальность СУ и позволить перераспределять ресурсы в зависимости от нагрузки сети. Мы предполагаем, что управляющие узлы должны обмениваться информацией - запросами и ответами с помощью некоторого протокола. S. Shao и другие в своей работе [2] считают что запросы могут передаваться по Wi-Fi. Однако, для сети заправок передача данных по Wi-Fi является слишком зависимой от окружающей среды, поэтому мы считаем, что необходимо использование и проводных технологий Ethernet совместно с протоколом, базирующимся на клиент-серверной модели Request/Response по аналогии с компьютерными сетями. Одним из возможных протоколов передачи данных может быть использован протокол CAN (Controller Area Network), который в настоящее время широко распространен в промышленной автоматизации, технологиях "умного дома", автомобильной промышленности, многих других отраслях и является стандартом для автомобильной автоматизации.

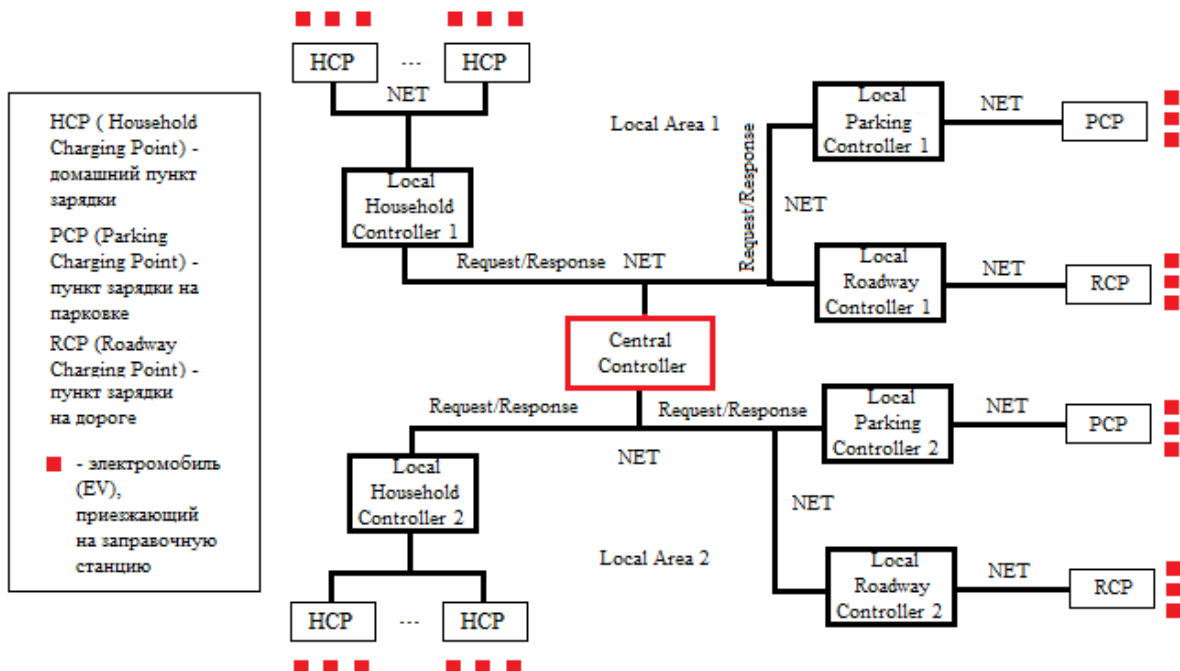


Рис. 2. Схема запросов электроэнергии от различных видов заправочных станций и обмена сообщениями для сетевой интеллектуальной инфраструктуры

На рис. 2 изображена схема запросов, поступающих от электромобилей, приезжающих на различные виды заправок (дома, на парковках, возле дорог). На схеме представлена сеть локальных контроллеров и один центральный, которые обмениваются между собой информацией и на основе ответа (Response) принимают решение о доступе к источнику энергии или же отказе. Для того чтобы система была устойчивой, нужно чтобы и в случае неверного ответа от узла, к которому был отправлен запрос на необходимую информацию (это может быть СС (Central Controller), или же соседнее управляющее устройство) было выработано корректное решение каждым локальным контроллером.

Взаимодействие контроллеров через передачу сообщений может обеспечить управление сетью, однако стратегии управления, которые реализуют как центральный, так и локальные контроллеры, могут быть весьма разнообразны. Выбор оптимальной стратегии и оценка ее устойчивости к широкому диапазону нагрузок является сложной задачей многокритериальной оптимизации, для решения которой необходимо использовать методы имитационного моделирования, поскольку эту задачу нельзя решить аналитическими методами.

Необходимо проверить весь диапазон состояний каждого объекта, что ведет к большой вычислительной сложности задачи. Задача анализа устойчивости прямо связана с рассмотрением всех возможных состояний системы, что в свою очередь требует больших временных затрат и вычислительных мощностей. Впрочем, проблема длительности симуляций всегда существует, когда речь идет о моделировании сложных систем. Вследствие этого предполагается, что необходимо использование технологий параллельного программирования для распределения вычислений между ядрами и процессорами суперкомпьютера. Модель включает несколько локальных устройств распределения энергии, обслуживающих заявки от некоторого множества автомобилей, приезжающих на заправки. Будем использовать упрощенный протокол передачи данных между контроллерами, и не будем включать в модель источники альтернативной энергии.

Поскольку характер потребности автомобилей в зарядке также носит случайный характер, то для определения устойчивости имитационной модели требуется генерация некоторого количества симуляций для каждого состояния системы S . Если количество состояний одного датчика K и в системе имеется N таких датчиков, то K^N - число возможных состояний. Таким образом, общее количество необходимых симуляций составляет K^{N^S} .

4. Эксперимент по моделированию анализа устойчивости алгоритма управления сетью заправочных станций

Для иллюстрации применимости предлагаемого подхода проведен анализ упрощенной модели, состоящей из центрального контроллера и двух заправок, каждая из которых имеет свой собственный локальный контроллер. Предполагается, что на каждой из заправок в определенный момент времени может заряжаться только один электромобиль. Таким образом каждая из заправок создает одну очередь из автомобилей, желающих зарядиться.

Для подстанций электрической сети, имеющих достаточно высокую мощность, нагрузку можно рассматривать как случайную величину с нормальным законом распределения. Эта гипотеза базируется на центральной предельной теореме теории вероятностей и математически ее результат можно представить в следующем виде:

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

где P_i - мощность отдельного потребителя; P_t - значение электрической нагрузки узла электрической сети, к которому присоединено n потребителей. Данное представление, справедливое для статической нагрузки, которую мы и будем рассматривать, позволяет оценивать общую нагрузку на узел сети и может использоваться контроллером для оценки состояния системы в текущий момент времени.

Пусть нагрузка на 1 заправке в некоторый момент времени t обозначается $P_{PCP1}(t)$, на второй $P_{PCP2}(t)$, а суммарная нагрузка на подстанцию, обслуживающую эти 2 заправочные станции $P_{total}(t)$, тогда принимая во внимание (1)

$$P_{total}(t) = P_{PCP1}(t) + P_{PCP2}(t).$$

Коэффициент нагрузки (LF - Load Factor) для данной системы рассчитывается как

$$LF = \frac{P_{max\ total}}{P_{aver\ total}}. \quad (2)$$

Чем ближе значение коэффициента нагрузки к 1, тем выше оптимизирована сеть и тем лучше для системы энергоснабжения, резкие выбросы же крайне нежелательны.

Для того чтобы симулировать очереди из машин создается поток заявок, каждая из которых характеризуется скоростью зарядки v_{charge} кВт/ч, энергия полностью заряженного аккумулятора W_{cap} и уровнем заряда в процентах q . Для каждой станции существуют несколько возможных режимов зарядки, характеризующихся соответствующей скоростью заряда - 3, 5, 10, 20, 30, 40 и 50 кВт/ч. Было принято допущение, что каждый из обслуживаемых автомобилей ставит своей целью полную зарядку аккумулятора (например, если станция сильно удалена от места, где можно опять пополнить уровень заряда). Следовательно, общее количество энергии, которое необходимо для зарядки рассчитывается как :

$$P_{req} = W_{cap} * q,$$

а время, необходимое для этого

$$t_{charge} = \frac{P_{req}}{v_{charge}} = \frac{W_{cap} * q}{v_{charge}}.$$

Объектом анализа на устойчивость был выбран следующий простой алгоритм центрального контроллера - допустим, при превышении некоторой суммарной нагрузки на подсистему P_{refuse} происходит отказ в зарядке тем пользователям, оцениваемое время для которых превышает некоторое значение t_{refuse} . Очевидно, что такой алгоритм слишком прост для реальной системы, однако в рамках данной задачи ставится целью оценка сложности даже сильно упрощенного алгоритма. Критерием устойчивости моделируемой системы примем входение коэффициента нагрузки в некоторый диапазон.

В данном случае функции локального контроллера сведены к минимуму - он просто пересылает полученный запрос на выдачу электроэнергии центральному контроллеру, управление этой простой сетью таким образом получается полностью централизованным. Для того чтобы убедиться, что алгоритм управления центральным управляющим элементом является устойчивым на всем множестве входных значений, будем варьировать параметры P_{refuse} и t_{refuse} , собирая среднее статистическое значение LF и совершая N симуляций обработки главным контроллером двух очередей заявок с заправок на протяжении суток для каждой пары этих коэффициентов, задающих алгоритм управления. Варьирование параметра P_{refuse} достигалось изменением значения коэффициента α , такового что

$$P_{refuse} = \alpha \cdot P_{max},$$

где P_{max} - максимально допустимая для общей подстанции нагрузка. В проведенном эксперименте P_{max} являлось некоторой фиксированной величиной

Структурная схема алгоритма работы центрального контроллера приведена на рис. 3. Разработанная программа позволяет оценить устойчивость его алгоритма управления. Для этого значения коэффициента α варьируются на отрезке $[0; 1]$ с шагом 0.05, а параметра t_{refuse} (в минутах) на отрезке $[30; 600]$ с шагом 15 минут.

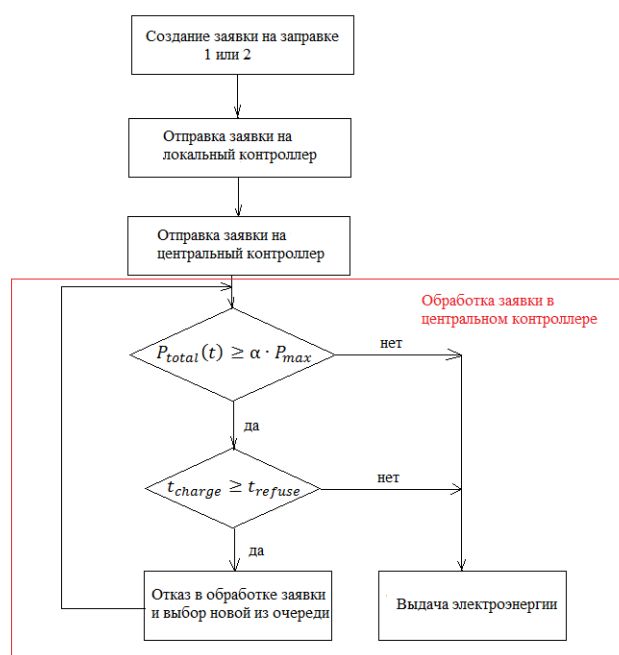


Рис. 3. Структурная схема алгоритма работы центрального контроллера.

Результаты были получены для значения $N=1000$, при котором значение среднее значение LF (за 24 часа) на N симуляциях имеет достаточно небольшое отклонение от математического ожидания (было определено путем экспериментов).

На рис. 4 представлен график зависимости коэффициента нагрузки от варьируемых параметров, на котором можно видеть при каких значениях происходит резкий скачок LF , при том что оптимальным является приближение к 1.

Приняв за критерий устойчивости исследуемого алгоритма $LF \leq 3.5$, можно определить значения параметров α и t_{refuse} , при которых поведение системы является некорректным (рис. 5).

Таким образом при анализе очень простого алгоритма с изменением параметров α на отрезке $[0; 1]$ с шагом 0.05, t_{refuse} на отрезке $[30; 600]$ с шагом 15 минут и количеством симуляций $N=1000$, суммарное время, потребовавшееся разработанной однопоточной программе для вычислений на мощном современном компьютере составило 54 минуты. Мы получили среднее время вычисления одного элемента из результирующей матрицы $t_{LF_i} \approx 4,15$ с.

Проведенные исследования подтвердили возможность оценки устойчивости СУ с помощью средств имитационного моделирования и позволили определить временные характеристики процесса анализа. Полученные результаты показывают высокую вычислительную сложность данной задачи даже для упрощенной модели, состоящей из двух локальных контроллеров пунктов зарядки электромобилей, запрашивающих разрешение на подключение абонентов у центрального контроллера. Это обуславливает необходимость переноса процесса моделирования в параллельную среду.

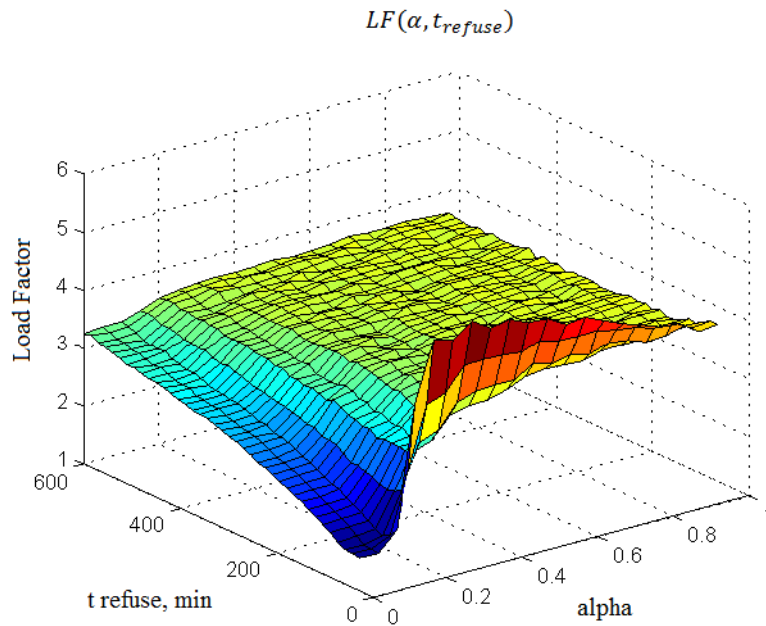


Рис. 4. Зависимость коэффициента нагрузки системы от параметров α и t_{refuse} .

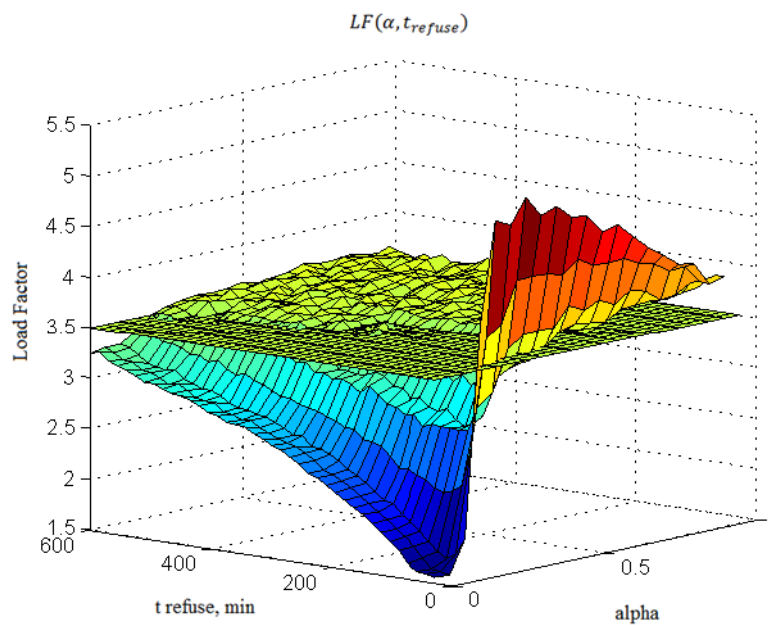


Рис. 5. Визуализация значений α и t_{refuse} , при которых математическое ожидание коэффициента нагрузки не удовлетворяет критерию устойчивости системы управления сетью заправок

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davydova A., Lupin. S., Chakirov R., Vagapov Y. Optimization of In-home Charging Schedule of Plug_in Electric Vehicle // Conference on Electrical and Computer Systems, Ottawa, Ontario, Canada 22-24 August 2012, Paper No. 204.

2. *Shao S., Pipattanasomporn M.* Challenges of PHEV penetration to the Residential Distribution Network // Power & Energy Society General Meeting, PES'09, IEEE, 2009.
3. *110th Congress of the United States.* "Title XIII (Smart Grid)", Energy Independence and Security Act of 2007. Washington, DC: Dec. 2007, pp. 292-303.
4. *Brown H., Suryanarayanan A* Survey Seeking a Definition of a Smart Distribution System // IEEE, 2009.