

# Имитационное моделирование при оценке живучести цифровых систем управления

А.П. Давыдова<sup>1</sup>, Ю.Ф. Вагапов<sup>2</sup>, С.А. Лупин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

<sup>2</sup>Glyndwr University, Wrexham, Wales, United Kingdom

[lupin@miee.ru](mailto:lupin@miee.ru)

**Аннотация** — Рассматривается вопрос оценки живучести интеллектуальных цифровых систем управления. Приведена имитационная модель системы управления сетью зарядных станций для электромобилей и исследована возможность ее применения для сравнительной оценки различных стратегий управления.

**Ключевые слова** — цифровые системы управления; оптимальное управление; имитационное моделирование; электромобили.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современной жизни человека окружают различные сложные технические системы, обеспечивающие удовлетворение его потребностей. Управление такими системами невозможно без использования средств автоматизации. Доминирующей тенденцией в этом процессе является повышение живучести цифровых систем управления (СУ), устойчивых как к изменению нагрузки, так и к недостоверной информации, и замена человека автоматом в контуре управления. Это становится возможным только в том случае, если автоматическая система управления обеспечивает функционирование объекта во всем диапазоне изменения входных параметров. Для обеспечения живучести системы ключевым фактором является уровень интеллектуальности алгоритма управления, лежащего в основе функционирования этой СУ. Таким образом, понятия живучести системы и интеллектуальности алгоритма тесно связаны и оба направлены на обеспечение роста надежности. А именно на этом и необходимо делать упор при построении сложных критических систем управления в энергоемких отраслях.

В общем случае анализ алгоритмов, лежащих в основе работы СУ, является вычислительно сложной задачей, но сегодня для ее решения могут быть использованы современные параллельные вычислители.

В работе предлагается использовать имитационное моделирование в качестве инструмента анализа живучести СУ. В качестве примера рассматривается систе-

ма управления сетью зарядных станций для электромобилей (EV - Electrical Vehicle).

Рост интереса потребителей к EV напрямую связан с исчерпаемостью запасов ископаемого топлива, экологическими проблемами - загрязнением окружающей среды вредными выбросами в атмосферу и парниковым эффектом [1]. Считается, что в обозримом будущем именно перспективные виды электромобилей и использование регенеративных источников энергии позволят улучшить экологию, особенно в мегаполисах.

## II. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

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. 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 бытовыми электроприборами.

Энергосистема должна уметь приспосабливаться и адаптироваться к таким изменениям, иначе говоря, быть интеллектуальной. Считается, что будущее именно за такими системами управления энергоресурсами. В 2007 году 110-м Конгрессом США был выпущен Акт об энергетической независимости и безопасности (EISA07) [2]. В нем 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 [3], 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 продвинутое инструменты.

### III. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Для оценки функциональности системы управления сетью зарядных станций была разработана и программно реализована на языке Java [4] модель, предназначенная для исследования устойчивости различных алгоритмов распределения потоков заявок, поступающих от владельцев электромобилей, которые являются мобильными объектами. При программировании модели использовалась парадигма объектно-ориентированного программирования [5].

Модель позволяет симулировать движение электромобилей в течение суток в рамках некоторой области, в которой распределены зарядные станции. На зарядных станциях находится некоторое количество колонок, между которыми распределяется очередь из автомобилей. Объектом исследований на устойчивость является стратегия распределения поступающих на вход заявок от мобильных источников - электромобилей.

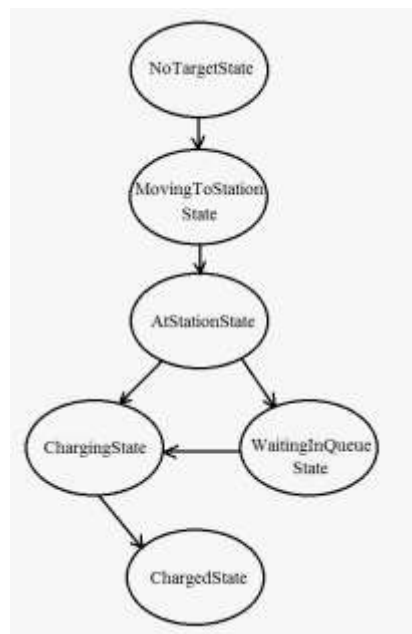
Каждая заявка имеет следующие характеристики:

- скорость зарядки  $v_{charge}$  (кВт/ч);
- емкость аккумулятора  $W_{cap}$  (кВт);
- текущий уровень заряда (%);
- пространственные координаты машины.

В модели программно реализован интерфейс задания параметров алгоритма оптимального выбора места расположения зарядной станции для каждой поступающей заявки. Имплементация разных алгоритмов в модель без изменения ее структуры дает возможность исследовать их эффективность, запуская режим суточной симуляции. В реализованных для исследования алгоритмах критериями выбора подходящей зарядной станции являются:

- близость от текущего положения автомобиля;
- величина очереди на ней.

Модель оперирует набором доменных объектов, главными из которых являются зарядная станция, колонка зарядной станции, автомобиль, несколько видов цифровых датчиков и цифровой контроллер, в котором реализована основная логика исследуемой системы управления нагрузкой на сеть зарядных станций.



**Рис. 1. Диаграмма состояний электромобиля в модели системы управления сетью зарядных станций**

Автомобиль характеризуется:

- идентификационным номером id;
- пространственными координатами;
- зарядной станцией, по направлению к которой он движется (этот параметр появляется у автомобиля только после того, как контроллер выдаст ему ответ на запрос к какой станции направиться).

СУ необходимо сопоставить каждой заявке в соответствии адрес зарядной станции, находящейся поблизости. Каждая зарядная станция имеет некоторое число колонок, а суммарная нагрузка станции рассчитывается как  $P_{station} = \sum_{i=1}^n P_{dispenser}$ .

Конфигурация исследуемой модели включает:

- 3 зарядных станции;
- 5 колонок на каждой станции;
- на каждой из колонок находится видеокамера, с которой поступает информация о длине очереди на данной колонке;
- 200 - суммарное количество машин, отсылающих заявки в течение суток;
- количество симуляций модели с одинаковыми параметрами  $S = 100$ .

Каждый электромобиль может находиться в одном из 6 состояний, указанных на диаграмме (рис. 1). В случае если на станции имеются свободные колонки, то автомобиль непосредственно переходит к зарядке, если же таковых нет, то становится в очередь. Загруженность станций (характеризующаяся длиной очередей на колонках) является ключевым фактором при принятии решения о направлении определенного объекта на станцию.

Целью исследования является оценка способности алгоритма управления сетью зарядных станций принимать правильное решение, при условии, что на одной из этих станций датчик или цифровая система обработки информации выдают ложный сигнал.

В работе проводится сравнение эффективности следующих алгоритмов:

– *Camera Based Fetch Algorithm (CBFA)*: алгоритм выбора наименее загруженной зарядной станции, к которой должен двигаться автомобиль, основанный исключительно на показаниях видеокамер возле каждой из колонок  $L_{K1}$ ;

– *Reliable Fetch Algorithm (RFA)*: интеллектуальный алгоритм выбора зарядной станции, учитывающий не только информацию с видеокамер, но и дополнительные датчики для принятия управляющего решения. Данный алгоритм присваивает изначальную минимальную длину очереди равной длине очереди на первой колонке, а затем высчитывает 2 значения для оценки длины очереди на каждой колонке

$$L_{K1} = \text{dispenser.getVideoCamera().Length()};$$

В случае если  $L_{K1} = L_{K2}$  и  $L_{K1} < L_{\min}$ , то  $L_{\min} = L_{K1}$ . Если же  $L_{K1} \neq L_{K2}$ , то рассчитывается среднее значение  $L_K = (L_{K1} + L_{K2})/2$ . Если  $L_K < L_{\min}$ , то  $L_{\min} = L_K$ .

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведена серия из S симуляций с фиксированными параметрами. При этом для каждого набора вариантов количество обслуженных машин суммируется. На основе полученных данных оценивается математическое ожидание полученной выборки и среднее количество обслуженных в сутки электромобилей с применением выбранной стратегии:

$$N_{\text{charged}} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S N_{\text{charged}i}$$

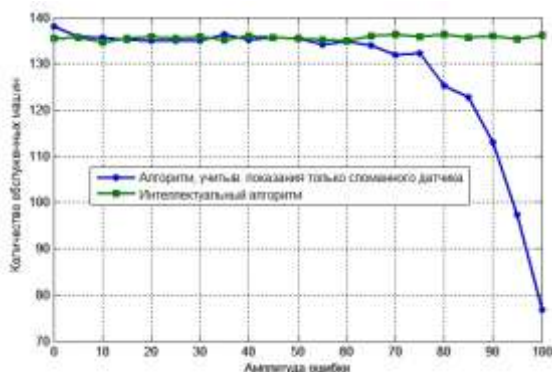


Рис. 2. Сравнение алгоритмов по количеству обслуженных электромобилей в зависимости от амплитуды ошибки неисправного датчика

Сломанный датчик выдает длину очереди на колонке по следующей формуле:

$$L_{\text{broken}} = L_{\text{real}} * \left(1 - \frac{Aml_{\text{err}}}{100}\right),$$

где  $L_{\text{broken}}$  - длина очереди, выдаваемая сломанным датчиком,  $L_{\text{real}}$  - реальная длина очереди,  $Aml_{\text{err}}$  - амплитуда ошибки.

На рис. 2 показаны результаты исследования 1 и 2 алгоритмов, из которых видно, что **RFA** оправдывает звание интеллектуального алгоритма и его зависимость количества обслуженных автомобилей от амплитуды ошибки реализует практически идеальную прямую на графике.

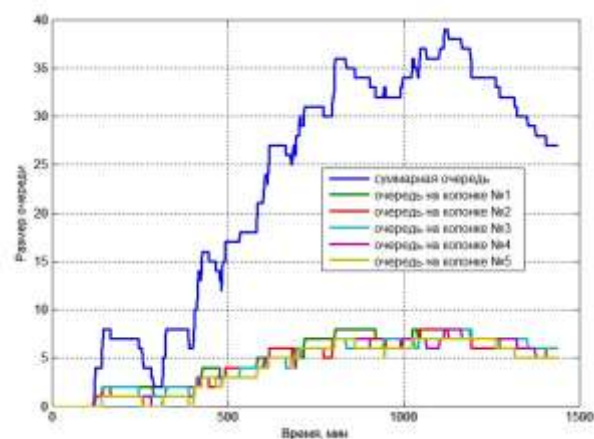


Рис. 3. Распределение автомобилей между колонками станции при неисправном датчике и использовании алгоритма RFA

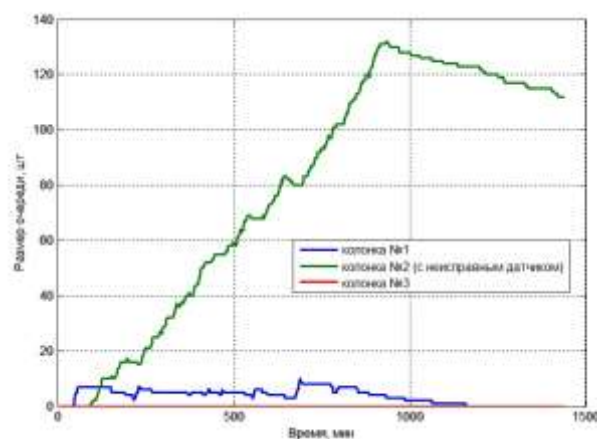


Рис. 4. Мониторинг размера очереди на зарядных станциях при 1 неисправном датчике и использовании алгоритма CBFA

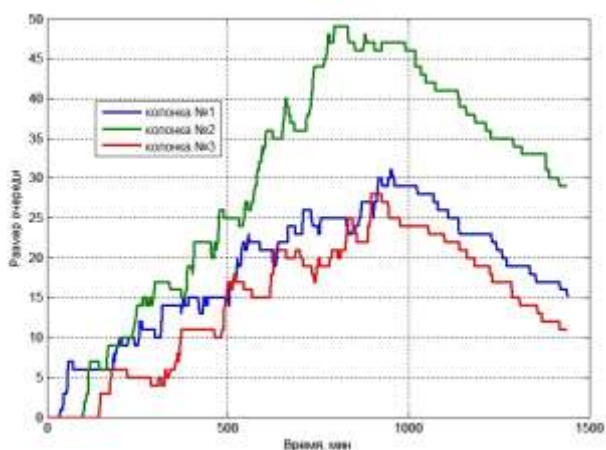
Результаты симуляций приведены в таблице 1 и на рисунках 2-5. В случае, если на станции имеется сломанный датчик, который в конкретном случае со 100% вероятностью выдает некорректные данные (эта величина указана по оси x), то начиная с некоторого значения вероятности ошибки, первый из использованных алгоритмов начинает работать совершенно неэффективно, и количество обслуженных автомобилей резко падает. Данные для анализа были получены

путем перебора с некоторым шагом всех возможных значений вероятности ошибки датчика от 0 до 1.

Таблица 1

*Количество обслуженных сетью зарядных станций электромобилей для 2х алгоритмов в зависимости от амплитуды ошибки неисправного датчика*

| $Amp_{Error} (\%) \setminus N_{charged}$ | 0.00  | 5.00  | 10.00 | 15.00 | 20.00 | 25.00 | 30.00 | 35.00 | 40.00 | 45.00  | 50.00 |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| <b>CBFA</b>                              | 138   | 136   | 136   | 135   | 135   | 135   | 135   | 136   | 135   | 136    | 135   |
| <b>RFA</b>                               | 136   | 136   | 135   | 135   | 136   | 135   | 136   | 135   | 136   | 136    | 135   |
| $Amp_{Error} (\%) \setminus N_{proc}$    | 55.00 | 60.00 | 65.00 | 70.00 | 75.00 | 80.00 | 85.00 | 90.00 | 95.00 | 100.00 |       |
| <b>CBFA</b>                              | 134   | 135   | 134   | 132   | 132   | 125   | 123   | 113   | 97    | 77     |       |
| <b>RFA</b>                               | 135   | 135   | 136   | 136   | 136   | 136   | 136   | 136   | 135   | 136    |       |



**Рис. 5. Мониторинг размера очереди на зарядных станциях при 1 неисправном датчике и использовании алгоритма RFA**

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования показали, что в случае некорректной работы одного из датчиков алгоритм, не делающий проверки полученных данных на достоверность, перестает справляться со своей задачей - эффективно распределять заявки на заправку между зарядными станциями. Поскольку датчик выдает ложную информацию о загруженности колонки, длина очереди на ней всегда равна нулю. А это приводит к тому, что на этой станции скапливается очередь, ведь СУ направляет к ней все новые и новые заявки. Второй же алгоритм делает валидацию поступающих данных, и в случае расхождения информации из нескольких источников - усредняет показания. Как видно из рис. 2 и 5 этот подход позволяет решить проблему.

Даже в случае исследования только одного параметра алгоритма управления задача анализа живучести является вычислительно сложной. Это говорит о целесообразности переноса вычислений в распределенную среду. Используемый алгоритм оценки устойчивости допускает такой подход, по-

скольку в данном случае симуляции не являются зависимыми по данным и могут быть распараллелены путем распределения по узлам вычислительной среды.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают возможность применения имитационного моделирования для анализа интеллектуальных алгоритмов в системах управления. Их использование повышает надежность сложных цифровых систем и уменьшает количество используемых датчиков. Это является существенным преимуществом над используемым сейчас механизмом резервирования. Оценка живучести интеллектуальных систем управления, проводимая средствами имитационного моделирования, является требовательной к вычислительным ресурсам задач, для решения которой необходимо использовать технологии распределенных вычислений.

## ПОДДЕРЖКА

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-го проекта РФФИ № 13-07-00661 «Использование распределенных вычислений в задачах устойчивости систем управления».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Frederis L. and Infield D. Renewable energy in power systems // Chichester, John Wiley & Sons Ltd. 2009. P. 2-11.
- [2] 110th Congress of the United States. Title XIII (Smart Grid) Energy Independence and Security Act of 2007. Washington, DC. Dec. 2007. P. 292-303.
- [3] Brown H. and Suryanarayanan A. Survey Seeking a Definition of a Smart Distribution System // IEEE. 2009.
- [4] Сайт с описанием Java Standart Edition. URL:[<http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/overview/index.html>] (дата обращения: 14.01.2014).
- [5] Иан Грэхем. Объектно-ориентированные методы. Принципы и практика. 3-е изд. М.: «Вильямс», 2004. 880 с.