

АЛГОРИТМ МОДУЛЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ

Ю.О. Гопаченко, А.Г. Якунин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

В данной статье рассматривается алгоритм, позволяющий рассчитывать показатели эффективности системы массового обслуживания электрических зарядных станций. На основе данных показателей производится анализ целесообразности размещения электрической зарядной станции при заданных характеристиках.

Ключевые слова: система массового обслуживания, электрические зарядные станции, показатели эффективности.

Ухудшение экологической обстановки городов, существенное повышение дефицита топливных ресурсов являются одними из наиболее актуальных и сложных проблем современного мира. Одним из направлений решения данных проблем является использование транспорта на электротяге, положительная динамика которого наблюдается ежегодно. Высокое влияние на рост объема рынка электромобилей оказывает активность развития сети зарядных станций для электромобилей. [1]

Соответственно, с ростом мирового рынка электромобилей и активно развивающейся зарядной инфраструктуры возникает потребность в разработке системы, позволяющей моделировать эффективное распределение сети электрических зарядных станций (ЭЗС) для электромобилей с учетом технических характеристик зарядных устройств, электромобилей, а также параметров населенного пункта, в котором они расположены.

Исследуемая система массового обслуживания (СМО) электрических зарядных станций относится к многоканальным СМО с ограниченной длиной очереди, то есть имеется несколько каналов обслуживания, на которые поступает поток заявок. Заявка, поступившая в момент, когда все каналы заняты, становится в очередь и ожидает обслуживания. Поскольку количество мест в очереди определяется пропускной способностью ЭЗС и ограничено, заявка, пришедшая в момент, когда все места в очереди каждого канала заняты, покидает систему необслужен-

ной [2].

Структура, а также дисциплина очереди системы определяется такими характеристиками как:

- количество электрических автомобилей в населенном пункте, владельцы которых предпочитают быструю зарядку на станции медленной домашней (входящий поток заявок);
- количество электрических зарядных станций, а также количество зарядных устройств (каналов обслуживания) на каждой;
- расположение ЭЗС в населенном пункте;
- мощность ЭЗС;
- количество рабочих часов ЭЗС;
- технические характеристики электромобилей, такие как: емкость аккумулятора, запас хода [3, 4].

Рассмотрим n -канальную систему массового обслуживания с ожиданием, в которую поступает простейший поток заявок с интенсивностью λ ; интенсивность обслуживания μ (т.е. в среднем непрерывно занятый канал будет выдавать $\rho = \lambda/\mu$ обслуженных заявок в единицу времени).

Длительность обслуживания – случайная величина, подчиняющаяся показательному закону распределения. Поток обслуживания является простейшим пуассоновским потоком событий.

В качестве показателей эффективности одноканальной СМО с ограниченной длиной очереди рассматриваются:

A – абсолютная пропускная способность СМО;

АЛГОРИТМ МОДУЛЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ

Q – относительная пропускная способность;
 $P_{отк}$ – вероятность отказа;
 $P_{оч}$ – вероятность образования очереди;
 $K_{зан}$ – среднее число занятых каналов;
 $L_{сист}$ – среднее число находящихся в системе заявок;
 $T_{сист}$ – среднее время пребывания заявки в системе;
 $L_{оч}$ – средняя длина очереди;
 $T_{оч}$ – среднее время ожидания в очереди [5].

Частота появления событий, поступающих в СМО в единицу времени λ – частота появления электромобиля на зарядной станции, определяется по формуле:

$$\lambda_{ref} = \frac{S_{km}}{S_{pr}},$$

где: S_{km} – суточный пробег электромобиля,
 S_{pr} – запас хода электромобиля.

Запас хода – техническая характеристика электромобиля, суточный пробег задается исходя из статистических данных. Например, по данным аналитического агентства «АВТОСТАТ» средний пробег легкового автомобиля в России составляет 16,7 тыс. км в год. Таким образом, средний суточный пробег автомобиля может составить 45,75 км [6].

Количество прибывающих на ЭЗС электромобилей в сутки, определяется по формуле:

$$N_{el,d} = N_{el} \cdot \lambda_{ref},$$

где: N_{el} – количество электромобилей в населенном пункте, λ_{ref} – частота зарядки электромобиля в сутки.

Географическое расположение ЭЗС относительно центра населенного пункта оказывает значительное влияние на количество прибывающих электромобилей на ЭЗС в сутки.

Процент снижения количества электромобилей, прибывающих на ЭЗС, незначительно смещенной от центра населенного пункта – 10,8%, значительно смещенной – 15,65%.

Коэффициенты, указывающие количество ЭЗС определенного типа:

a_1 – количество ЭЗС, значительно удаленных от центра;

a_2 – количество ЭЗС, незначительно удаленных от центра;

a_3 – количество ЭЗС, расположенных в центре.

Тогда количество электромобилей, прибывающих на одну ЭЗС первого типа рассчитывается по формуле:

$$N_{el1} = \frac{N_{el} \cdot (1 - d_1)}{3},$$

где: N_{el} – количество электромобилей в насе-

ленном пункте; d_1 – коэффициент, равный 10,8 – процент снижения количества электромобилей прибывающих на ЭЗС, значительно смещенной относительно центра населенного пункта.

Константа в знаменателе указывает на число типов ЭЗС, по которым производится распределение.

Тогда количество электромобилей, прибывающих на одну ЭЗС данного типа:

$$N_{a1} = \frac{N_{el1}}{a_1}.$$

Тогда количество электромобилей, прибывающих на одну ЭЗС второго типа рассчитывается по формуле:

$$N_{el2} = \frac{N_{el}}{3} \cdot (1 + d_1) \cdot (1 - d_2),$$

где: d_2 – коэффициент, равный 15,65 – процент снижения количества электромобилей прибывающих на ЭЗС, значительно смещенной относительно центра населенного пункта.

Количество электромобилей, прибывающих на одну ЭЗС данного типа:

$$N_{a2} = \frac{N_{el2}}{a_2}.$$

Тогда количество электромобилей, прибывающих на одну ЭЗС третьего типа рассчитывается по формуле:

$$N_{el3} = \frac{N_{el}}{3} \cdot (1 + (1 + d_1) \cdot d_2).$$

Количество прибывающих на одну ЭЗС электромобилей данного типа:

$$N_{a3} = \frac{N_{el3}}{a_3}.$$

Второй параметр, влияющий на количество прибывающих электромобилей на ЭЗС в сутки – число собственников, предпочитающих заряжать электромобиль на станции, домашней зарядке.

Собственников электромобилей можно условно разделить на три группы:

1. Использующих для зарядки только домашнюю сеть (N_{elu1}), где u_1 (users) – коэффициент, определяющий число владельцев, использующих для зарядки домашнюю сеть от общего количества электромобилей, соответственно:

$$N_{elu1} = N_{el} \cdot u_1.$$

2. Использующих как домашнюю сеть, так и зарядные станции (N_{elu2}), где u_2 – коэффициент, определяющий число владельцев, использующих для зарядки как домашнюю сеть, так и зарядные станции от общего количества электромобилей, соответственно:

$N_{el2} = N_{el} \cdot u_2 \cdot (u_{21} + u_{22})$,
 где: u_{21} – процент, характеризующий частоту применения домашней сети; u_{22} – процент, характеризующий частоту применения ЭЗС;

$$u_{21} + u_{22} = 1.$$

3. Используя только зарядные станции (N_{el3}).

Таким образом, число владельцев, использующих для зарядки электромобилей станции, определяется по формуле:

$$N_{el3} = N_{el} \cdot (1 - u_1 - u_2 \cdot u_{21}).$$

Количество прибывающих на ЭЗС в сутки электромобилей рассчитывается:

$$N_{el,d} = N_{an} \cdot (1 - u_1 - u_2 \cdot u_{21}) \cdot \lambda_{ref},$$

где: N_{an} – количество электромобилей на ЭЗС, в зависимости от ее расположения (N_{el1} , N_{el2} , N_{el3}) [7, 8].

Интенсивность потока заявок в зависимости от времени суток определяется по

формуле:

$$\lambda_i = N_{el,d} \cdot \frac{k_i}{\sum_{i=t_1}^{t_2} k_i},$$

где: $N_{el,d}$ – количество электромобилей на ЭЗС в сутки; k_i – коэффициент, задающий распределение интенсивности поступления заявок, в зависимости от времени суток, определяемый для каждого часа; $\sum_{i=t_1}^{t_2} k_i$ – сумма коэффициентов всех рабочих часов суток.

t_1 , t_2 – начало и окончания рабочего времени суток, через которые количество рабочих часов в сутки определяется по формуле:

$$\Delta t = t_2 - t_1,$$

где: t_1 , t_2 являются водящими параметрами и задаются непосредственно перед началом расчета.

Значения коэффициентов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение коэффициентов интенсивности по времени суток k_i

Время	Коэффициент	Время	Коэффициент
00:00 – 01:00	0,02	12:00 – 13:00	0,01
01:00 – 02:00	0,01	13:00 – 14:00	0,08
02:00 – 03:00	0,016	14:00 – 15:00	0,02
03:00 – 04:00	0,0026	15:00 – 16:00	0,02
04:00 – 05:00	0,0026	16:00 – 17:00	0,02
05:00 – 06:00	0,004	17:00 – 18:00	0,15
06:00 – 07:00	0,006	18:00 – 19:00	0,12
07:00 – 08:00	0,008	19:00 – 20:00	0,10
08:00 – 09:00	0,08	20:00 – 21:00	0,09
09:00 – 10:00	0,07	21:00 – 22:00	0,07
10:00 – 11:00	0,01	22:00 – 23:00	0,05
11:00 – 12:00	0,01	23:00 – 00:00	0,03

Расчет почасовой интенсивности электромобилей дает возможность построить график зависимости суточной интенсивности количества входящих заявок на ЭЗС от времени суток приведен на рисунке 1.

Средняя интенсивность за сутки определяется отношением суммы интенсивностей каждого часа рабочего времени суток к количеству рабочих часов ЭЗС и рассчитывается по формуле:

$$\bar{\lambda}_t = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_2} \lambda_i}{\Delta t}.$$

Интенсивность потока обслуживания (μ) – количество заявок, которое может обслужить один канал ЭЗС в единицу времени.



Рисунок 1 – График зависимости суточной интенсивности количества входящих заявок на ЭЗС от времени суток

АЛГОРИТМ МОДУЛЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ

Среднее время заряда электромобиля определяется, с учетом того, что зарядка осуществляется на 80% от емкости аккумулятора электромобиля, по формуле:

$$\overline{t_{ch}} = \frac{\overline{c_{el}} \cdot 0,8}{P_{esc}},$$

где: c_{el} – емкость аккумуляторной батареи электромобиля; P_{esc} – мощность зарядного устройства ЭЗС.

Суточная интенсивность потока обслуживания n -каналами ЭЗС определяется по формуле:

$$\mu_{esc} = \frac{\Delta t}{t_{ch}} \cdot n,$$

где: n – количество каналов обслуживания ЭЗС.

Почасовая интенсивность потока обслуживания n каналов:

$$\mu = \frac{1}{t_{ch}} \cdot n.$$

Количество заявок, обслуженных n каналами за рабочий час i :

$$\rho_i = \frac{\overline{\lambda_i}}{\mu}.$$

Количество заявок, обслуженных n каналами за сутки:

$$\rho = \frac{N_{el,d}}{\mu_{esc}},$$

где: $N_{el,d}$ – количество электромобилей, прибывающих на ЭЗС в сутки; μ_{esc} – суточная интенсивность потока обслуживания n -каналами ЭЗС.

Заявка, поступившая в момент, когда все n каналов заняты, становится в очередь и ожидает обслуживания. Так как количество мест в очереди ограничено числом m , тогда заявка, пришедшая в момент, когда в очереди длиной m каждого n -канала уже стоят m -заявок, покидает систему необслуженной [9, 10].

Количество мест в очереди на определенный момент времени можно определить по формуле:

$$m_i = \frac{t_2 - t_1}{t_{ch}} \cdot n,$$

где: t_1 – время, на момент которого рассчитывается количество мест в очереди; n – количество каналов обслуживания.

Система имеет следующие состояния:

- 1) S_0 – все каналы свободны;
- 2) S_1 – занят только один канал;
- 3) S_n – заняты все n каналов;
- 4) S_{n+1} – заняты все n каналов и одна заявка в очереди;
- 5) S_{n+m} – заняты все n каналов и все m мест в очереди.

Переходы системы из состояния в со-

стояние происходят под влиянием потоков событий, где: λ и μ – интенсивности этих потоков.

Размеченный граф состояний системы обслуживания приведен на рисунке 2.

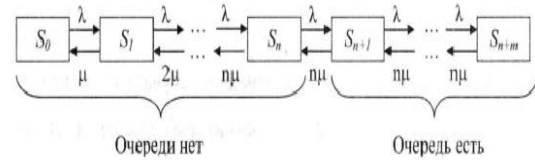


Рисунок 2 – Размеченный граф состояний

Предельные вероятности состояний:

$$p_0 = \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^{n+1}}{nn!} \cdot \frac{1 - (\frac{\rho}{n})^m}{1 - \rho/n!}\right)^{-1};$$

$$p_1 = \rho p_0; p_2 = \frac{\rho^2}{2!} p_0; \dots; p_n = \frac{\rho^n}{n!} p_0;$$

$$p_{n+1} = \frac{\rho^{n+1}}{nn!} p_0; p_{n+2} = \frac{\rho^{n+2}}{n^2 n!} p_0; \dots;$$

$$p_{n+m} = \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!} p_0;$$

$$P_{отк} = p_{n+m} = \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!} p_0.$$

На основе полученных данных получаем возможность вычислить показатели эффективности:

– вероятность образования очереди:

$$P_{оч} = \sum_{i=0}^{m-1} p_{n+i} = \frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{1 - (\frac{\rho}{n})^m}{1 - \frac{\rho}{n}} p_0;$$

– относительная пропускная способность:

$$Q = 1 - P_{отк};$$

– абсолютная пропускная способность:

$$A = \lambda Q;$$

– среднее число занятых каналов:

$$k_{зан} = \frac{A}{\mu} = \rho Q;$$

– среднее число заявок, находящихся в очереди:

$$L_{оч} = \frac{\rho^{n+1}}{nn!} \cdot \frac{1 - (\frac{\rho}{n})^m (m + 1 - \frac{m}{n} \rho)}{(1 - \frac{\rho}{n})^2};$$

– среднее время ожидания в очереди:

$$T_{оч} = \frac{L_{оч}}{\lambda};$$

– среднее число заявок в системе:

$$L_{сист} = L_{оч} + k_{зан};$$

– среднее время пребывания заявки в СМО:

$$T_{сист} = \frac{L_{сист}}{\lambda}.$$

Таким образом рассчитываются показатели эффективности работы системы массового обслуживания электрической зарядной

станции. Ориентируясь на оптимальные показатели эффективности, можно установить наиболее приемлемые характеристики ЭЗС, такие как географическое расположение относительно населенного пункта, количество каналов обслуживания ЭЗС и мощность зарядных устройств, а также целесообразность размещение ЭЗС в данном населенном пункте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.autostat.ru/infographics/25457/>
2. Кошуняева Н.В., Патронова Н.Н. Теория массового обслуживания (практикум по решению задач)/САФУ им. М.В.Ломоносова. – Архангельск; САФУ, 2013 – 107 с.
3. Щетина В.А., Морговский Ю.Я., Ценер Б.И., Богомазов В. А. Электромобиль: техника и экономика – Л.: Машиностроение, 1987. – 253с.: ил.
4. Ставров О.А. Электромобили – М.: Транспорт, 1968. – 104с.

5. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Ковалев И.Н. Теория массового обслуживания: Учеб. пособие – М.: Высш. школа, 1982. – 256 с., ил.9.
6. <https://www.autostat.ru/news/6069/>
7. Б. П. Бусыгин " Электромобили. Учебное пособие - МАДИ, 1979 год, 37 стр.
8. Самаров К.Л. Математика. Элементы теории массового обслуживания, учеб. пособие – М.: Учебный центр "Резольвента", 2009. – 18 с.
9. И.В. Солнышкина Теория систем массового обслуживания: учеб. пособие / И.В. Солнышкина. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. - 76 с.
10. Галанина О.В. Экономико-математическое моделирование: модели теории массового обслуживания : учеб. пособие – С-Петербург: СПГАУ, 2013. – 20 с.

Якунин Алексей Григорьевич – д.т.н., профессор, тел.: (3852) 290-786, e-mail: yakunin@agtu.sechna.ru;
Гопаченко Юлия Олеговна – студентка.