

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

Електротехнічний  
(факультет)

Кафедра Електропривода  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

дипломної роботи

магістра

(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань 14 Електрична інженерія

(шифр і назва галузі знань)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

освітній рівень магістр

(назва освітнього рівня)

Кваліфікація 2151.2 (Int) Інженер-електромеханік

(код і назва кваліфікації)

на тему: Рациональне розташування і оптимізація параметрів зарядних станцій  
для електромобілів

Виконавець:

Студент 6 курсу, групи 141М-16-4

Шулаєв С.Є.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	<u>Балахонцев О.В</u>		
розділів:			
1,2,3	<u>Балахонцев О.В</u>		

Рецензент	Рогоза В.М.		
-----------	-------------	--	--

Нормоконтроль	Казачковський М.М.		
---------------	--------------------	--	--

Дніпропетровськ  
2018

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри  
Електроприводу  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Казачковський М.М.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 року

**ЗАВДАННЯ**  
на виконання кваліфікаційної роботи магістра  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)  
(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та  
електропривод»)

студенту 141М-16-4 Шулаєв С.Є.  
(група) (прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи : Раціональне розташування і оптимізація параметрів зарядних станцій для електромобілів

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від 31.10.2017 № 1806-л

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Характеристика об'єкту проектування, обґрунтування вимог до електроприводу та постановка задач проектування.	1.11.2017– 19.11.2017
Розрахунок та вибір електротехнічного обладнання, вибір функціональної системи керування, розробка моделі та її дослідження	20.11.2017– 4.12.2017
Аналіз шкідливих і небезпечних факторів та заходи щодо їх усунення	5.12.2017– 19.12.2017

Завдання видав \_\_\_\_\_

(підпис)

Балахонцев О.В.

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

Шулаєв С.Є.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

Термін подання дипломної роботи до ЕК \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 68 стор., 26 рис., 8 табл., 9 джерел.

**Об'єкт детальної розробки:** Зарядні станції для електромобілів і бортове обладнання електромобілів..

**Мета роботи:** Розробка методу визначення оптимального розташування необхідної кількості зарядних станцій для електромобілів таким чином, щоб задовольнити попит, забезпечити фактичний радіус обслуговування за умови мінімальних витрат на їх установку.

В роботі розглянуте питання розбудови зарядної інфраструктури для електромобілів. Проаналізовані технології та характеристики сучасних електромобілів та їх батарей, побудована модель гальванічної батареї.

Запропоноване використання методу ієрархічної кластеризації для визначення оптимального місця розташування зарядних станцій. Сутність методу полягає у групуванні районів міста у кластери і вибору місця розташування зарядної станції таким чином, щоб забезпечити мінімум відстані до неї від центрів кластерів з урахуванням чисельності населення або інших факторів.

## РАЦІОНАЛЬНЕ РОЗТАШУВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 68 стр., 26 рис., 8 табл., 9 источников.

**Объект детальной разработки:** Зарядные станции для электромобилей и бортовое оборудование электромобилей.

**Цель работы:** Разработка метода определения оптимального расположения необходимого количества зарядных станций для электромобилей таким образом, чтобы удовлетворить спрос, обеспечить фактический радиус обслуживания при минимальных затратах на их установку.

В работе рассмотрен вопрос развития зарядной инфраструктуры для электромобилей. Проанализированы технологии и характеристики современных электромобилей и их батарей, построена модель гальванической батареи.

Предложено использование метода иерархической кластеризации для определения оптимального места расположения зарядных станций. Сущность метода заключается в группировке районов города в кластеры и выбора места расположения зарядной станции таким образом, чтобы обеспечить минимум расстояния до нее от центров кластеров с учетом численности населения или других факторов..

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ПАРАМЕТРОВ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

## **ABTRACT**

The explanatory note: 68 pages.,26 figures., 8 tables., 9 references

**Detailed design of the object:** Charging stations and electric vehicles.

**Purpose of work:** Development of the method of determining the optimal location of the required number of charging stations for electric vehicles in such a way as to satisfy demand, to provide the actual service radius at the minimum cost of their installation.

The paper deals with the development of charging infrastructure for electric vehicles. The technologies and characteristics of modern electric vehicles and their batteries are analyzed, the model of a galvanic battery is constructed.

The use of the hierarchical clustering method for determining the optimal location of charging stations is proposed. The essence of the method is to group the city districts into clusters and select the location of the charging station in such a way as to ensure a minimum distance to it from the cluster centers, taking into account the population size or other factors.

**RATIONAL POSITION AND OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF  
CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC MILLS.**

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	
1 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ	
1.1.1.1 Экологические вопросы	
1.2. Технологии электромобилей	
1.3. Анализ типовой тахограммы	
1.4. Актуальность повышения экономичности транспортных средств	
2. ИСЛЕДОВАНИЕ БАТАРЕИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ	
2.1. Характеристики накопителей электрической энергии	
2.2. Параметры батарей	
2.3. Модель гальванической батареи	
2.4. Характеристики зарядки батареи электрических транспортных средств	
3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ	
3.1. Критерии, факторы и ограничения оптимального размещения зарядных станций	
3.2. Метод иерархической кластеризации для определения точек спроса	
3.3. Алгоритм оптимизации размещения зарядных станций	
ВЫВОДЫ	

## Введение

Автотранспорт сегодня является самым распространенным и удобным способом передвижения. Но, несмотря на свои преимущества, он наносит основную долю экологического ущерба окружающей среде - до 63%. причем, загрязнение происходит и на стадиях производства, и в процессе эксплуатации, и при утилизации автомобилей, масел и топлива. При сжигании бензина в атмосферу выбрасываются тонны оксидов серы и азота, вызывая кислотные дожди. Также, бензиновые автомобили являются достаточно затратным видом транспорта. Эти факты привели к тому, что прогрессивные страны стали проектировать и создавать электромобили.

Электромобили работают на электрической энергии, хранящейся в аккумуляторных батареях, а не на бензине или дизеле, и не имеют вредных выхлопных газов. Данный вид транспортных средств может стать сильным конкурентом традиционным транспортным средствам, но из-за высокой стоимости накопителя энергии необходимо создавать более дешевые аккумуляторные батареи или более рационально конфигурировать электромеханическую систему.

Современная жизнь тесно связана с автомобилями. Перевозки пассажиров, грузов, продуктов питания, работа специальных служб - все это невозможно без автомобилей. Но в связи с различными политическими и экономическими неурядицами стоимость горючего постоянно растет, что ведет к удорожанию продуктов питания и разного рода услуг, связанных с транспортировкой.

# 1 Обзор технологий в области электромобилей и зарядных станций

Несмотря на относительно зачаточное состояние рынка, электрические автомобили представляют собой наиболее экологически чистые транспортные средства, так как они абсолютно без выбросов (если только не считать выбросы от завода-изготовителя). Электрические транспортные средства будут наверняка способствовать преодолению дефицита топлива в ближайшем будущем. Для поддержки электрических автомобилей потребуется редизайн энергосистемы вокруг новых зарядных станций и запланировать их подготовку круглосуточно для того чтобы предложить высокое качество обслуживания с точки зрения удобства использования.

Производители транспортных средств уже оснащают новые транспортные средства навигационными и информационно-развлекательными устройствами, а также беспроводными технологиями для поддержки связи транспортного средства с инфраструктурой, обеспечиваемой, например, 3G и будущими сотовыми сетями 4G. Разумеется, эта тенденция, вероятно, будет продолжаться и для электрических транспортных автомобилей. На будущих транспортных автомобилях, вероятно, будет предоставлена актуальная информация о местонахождении зарядной станции и ее состоянии с точки зрения количества пробок и среднего времени ожидания на данный момент. Эта информация может помочь отдельным пользователям динамически оптимизировать свое путешествие с точки зрения сокращенного времени поиска для зарядных станций, тарифов и в целом сокращенного времени отключения. Даже правительства могут использовать эту интеллектуальную транспортную инфраструктуру для стимулирования снижения загрязнения посредством надлежащей политики (например, при адаптации тарифов). Кроме того, могут информировать транспортные средства о текущих

условиях дорожного движения, чтобы обеспечить лучший выбор в часы пик. Окончательное видение - это сеть электрических транспортных средств, которые сотрудничают для эффективного использования инфраструктуры зарядки. Предполагается, что сетевые электрические транспортные средства совершают поездку до тех пор, пока они не обнаружат низкий заряд батареи и поскольку они подключены, например, к транспортной сети или сотовой сети, они получают информацию о зарядных станциях и направляются к этим станциям. С сегодняшней технологией, зарядка автомобиля по-прежнему занимает много времени, хотя разрабатываются быстрые системы зарядки, способные заряжать батарею довольно быстро.

## 1.1 Экологические вопросы

Прямые и косвенные выбросы электромобилей

Данный вопрос является краеугольным камнем всех противников электромобилей. Утверждается, что электрокары не слишком влияют на снижение выброса вредных веществ и не оказывают положительного влияния на окружающую среду. Это самое популярное заблуждение нивелируется самым простым образом. Для этого достаточно привести в пример понятие «углеродный след».

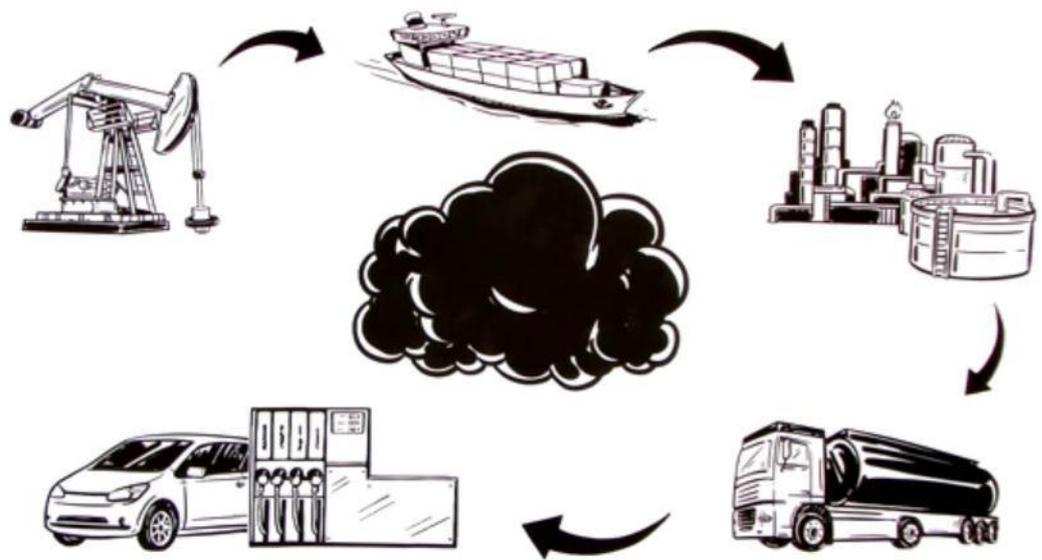


Рис1.Цепочка вредных выбросов или углеродный след

Данное определение демонстрирует преимущества электромобиля. Понятие углеродный след включает в себя все этапы вредных выбросов, которые связаны с использованием автомобилей с двигателем внутреннего сгорания и это не только выбросы из выхлопной трубы, но и все выделения, которые происходят для того чтобы привести конкретные автомобили в движение. Это выбросы при добывании и транспортировки нефти, переработки ее в топливо, его перевозки к заправочной станции, выбросы связанные с производством автомобилей и их техобслуживанием.

Как видим, цепочка вредных выбросов или углеродного следа довольно велика. А теперь подумаем, сколько из этой цепи исключается негативных моментов при использовании электромобиля. Пожалуй все, кроме определенных затрат на производство и транспортировку самих автомобилей. В результате видно, что прямые и не прямые выбросы электрокаров существенно ниже традиционных автомобилей.

С увеличением числа электромобилей вырастет потребление энергии, которое производится не самым экологически чистым способом.

На сегодняшний день, данную скептическую оценку еще можно оправдать. Да, действительно энергосистемы многих стран и Украины в том числе, возможно не готовы к массовой эксплуатации электромобилей.

Электричество во многом вырабатывается тепловыми и атомными станциями, которые тяжело назвать экологически чистыми. Но! Неужели, огромный нефтеперерабатывающий завод или несколько таких, несут меньшую угрозу, чем тепловые электростанции. Разве противились люди массовому использованию электронных гаджетов, энергию для которых вырабатывают атомные станции. Да и вообще, кто не знает, современный электромобиль тратит на быструю зарядку аккумуляторных батарей около 30 минут, это иногда меньше, чем заряжается старый мобильный телефон или ноутбук.

Несмотря на весь промышленный негатив, нельзя не упомянуть, что атомные и тепловые электростанции находятся вне пределов городов, часто образуя отдельную производственную локацию, в тоже время электромобили с нулевым уровнем выбросов рассчитаны непосредственно на эксплуатацию в густонаселенных мегаполисах, которые страдают от переизбытка автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, рабочие выхлопы которых и являются основным источником загрязнений. Именно в этом состоит главный плюс электрокаров, очистить густонаселенные зоны от вредных выхлопов, предотвратить образование смогов, сделать крупные города более комфортными для жизни.

К тому же, мир переживает настоящий бум альтернативной энергетики, которая скорее всего займет немаленький процент от общего числа вырабатываемой энергии. Многие производители электромобилей, как раз и работают в кооперации с компаниями занимающимися производством солнечных панелей, которые способны альтернативным образом заряжать электрокар, не используя основные энергосети.

Для украинских скептиков использования электромобилей, хочется напомнить, что Украина, как ни странно, одно из самых активных государств

по внедрению альтернативных технологий получения энергии, что в свою очередь еще больше должно способствовать популяризации электромобилей.



Рис 2. «Солнечная» зарядная станция для электромобилей

Еще один момент, который обходят стороной критики электрических автомобилей, состоит в том, что большая часть электрокаров заряжается в ночное время, период самых низких тарифов и переизбытка энергии, поэтому при определенных раскладах электромобили даже помогают выровнять баланс вырабатываемой и потребляемой энергии.

Производство аккумуляторных батарей для электромобилей — одна из самых вредных отраслей промышленности

С этим можно согласиться, но лишь отчасти. Производство АКБ для электромобилей - не самая экологичная отрасль, но в процентном соотношении, выпуск аккумуляторов не в пример экологичнее указанному ранее «углеродному следу». Да, в них используются химически вредные компоненты, да используются производные нефти, но в тоже время компоненты АКБ подлежат практически полной переработке и утилизации, которая оставляет после себя незначительный объем не переработанного материала. Кроме того, в качестве конечного продукта, АКБ электромобилей абсолютно безопасны, не окисляются, не производят вредных и ядовитых испарений. И если на то пошло, тонущее судно с комплектами батарей,

гораздо безопасней для окружающей среды, чем танкер с пробоиной или взорвавшаяся нефтяная платформа у побережья Мексиканского залива.

Если представить себе конструкцию электромобиля, станет очевидным, что общее число комплектующих трансмиссии электромобиля в десятки раз меньше, чем у обычного автомобиля. Соответственно риск поломки, необходимость замены конкретной детали существенно снижается. Вместе с этим снижаются затраты на эксплуатацию, техническое обслуживание и как результат общее содержание электромобиля.

Аккумуляторные батареи, как утверждают многие, несущие самую главную угрозу, утилизируются на 98% практически у всех электромобилей. Кстати, почему не спросить у борцов за экологию, куда деваются все свинцово-щелочные аккумуляторы, такие безопасные и поддающиеся повторной переработке детали нынешних автомобилей.

Также, современные электромобили производятся с учетом того, чтобы в дальнейшем была возможна их полная утилизация, а не только отдельных комплектующих. Кроме того, много моделей уже выпускаются сделанными из вторсырья.

После 10 лет эксплуатации в электромобиле, аккумуляторные батареи способны еще столько же отработать в накопительной системе солнечной энергетики и лишь потом быть полностью переработанными. А в мире ДВС за 20 лет нужно будет сменить 4 автомобиля и еще неизвестно будут ли они утилизированы или нет.

Несмотря на немалое количество приведённых доводов не в пользу экологичности электромобилей, следует учитывать, что указали отдельные заявления критиков тенденции распространения такого транспорта. Единого же мнения на счёт вреда машин на электрической тяге для экологии пока не существует.

Несмотря на заверения ряда исследователей, оглашающих, казалось бы, достаточно уверенные доказательства существования проблем для окружающей среды, связанных с использованием электромобилей, споры в научной сфере относительно последствий производства и работы таких машин не прекращаются. Против внедрения автомобилей на электрической тяге в целом пока не выступают ни учёное сообщество, ни власти государств.

В силу дороговизны и несовершенства технических характеристик электромобилей единственным их преимуществом перед обычными машинами является отсутствие загрязняющих выхлопов. Очевидно, что если явных экологических преимуществ электромоторов перед двигателями внутреннего сгорания не окажется, а уж тем более в случае, если достоверно выяснится, что электромобили наносят больший вред природе, то они наверняка сдадут завоёванные позиции и полностью утратят шанс вытеснить бензиновые автомашины в будущем.

## 1.2 Технологии электромобилей

Классическая схема компоновки электропривода электромобиля (рис.3) состоит: из тяговой батареи, силового преобразователя (переменного или постоянного тока), системы управления и электродвигателя (синхронного, асинхронного или двигателя постоянного тока). Но в данной конфигурации есть существенный недостаток, так как небольшая удельная мощность аккумуляторных батарей приводит к существенному увеличению массы и низкого запаса хода электромобиля.

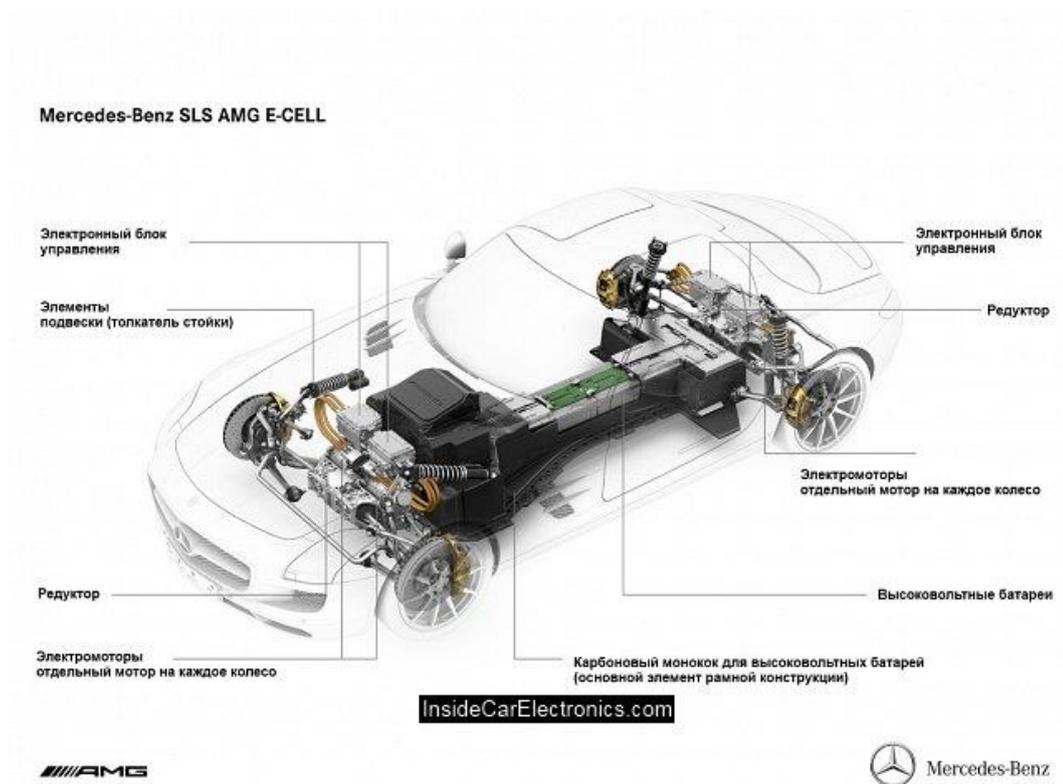


Рис 3. Сборка электромобиля Mercedes-benz SLS AMG E-CELL

Запас хода электромобилей может быть увеличен путем комбинирования химических источников тока с другими источниками энергии. Согласно публикациям в этом направлении ведутся работы широким фронтом. Можно привести примеры различных комбинаций источников тока. Рассмотрим наиболее известные из них.

Аккумуляторная батарея - контактная сеть. Примером такой комбинации может служить система, предложенная фирмой «Транзит систем корпорейшен Вестбери» (Transit System Corporation Westbero, США). На электромобиле «СтарКар» (Starcar) использовались аккумуляторные батареи, а также была предусмотрена возможность питания от внешнего источника энергии; электромобиль мог двигаться со скоростью 96 км / ч по специально оборудованной дороге с «третьей рейкой», питающей электроэнергией двигатель. От места стоянки к ближайшему пункту, где можно подключиться к электрифицированной дороге, источником питания служили аккумуляторные батареи. Затем электромобиль вливался в общий поток и в дальнейшем управлялся автоматически, для этого водитель должен был лишь набрать в устройстве пункт назначения. На специальных станциях не исключалась возможность дополнительной подзарядки аккумуляторных батарей.

Иначе проекту, разработанному также в США, часть высокоскоростных автострад должна быть оборудована электроприводами типа троллейбусных, подключившись к которым электромобиль может двигаться, упражняясь, возможно, автоматически, с большой скоростью и не тратя энергии аккумуляторов, а может быть даже пополняя ее.



*Рис. 4. Использование электрической сети для питания электрического транспортного средства.*

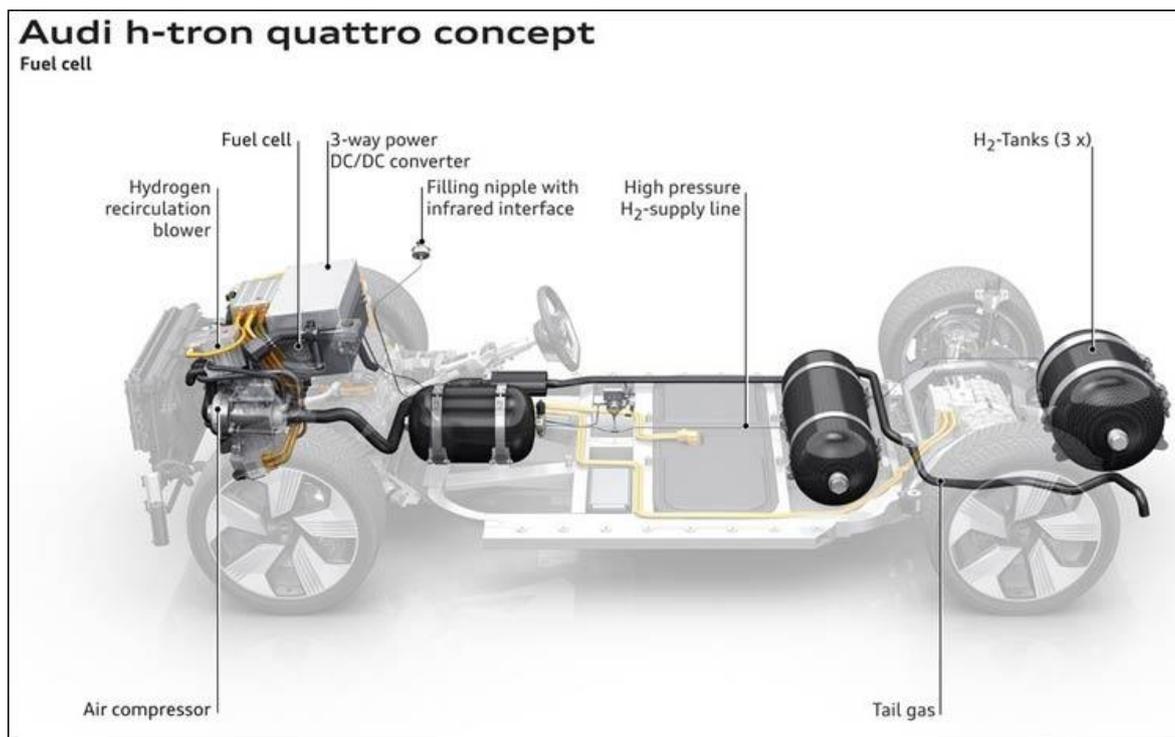
Аккумуляторная батарея - солнечная батарея. Аккумуляторные батареи электромобиля днем в безоблачную погоду могут подзаряжаться от солнечных батарей, расположенных на крыше электромобиля. Максимальная скорость такого электромобиля составляет 50 км / ч, а запас хода - до 100 км.

Аккумуляторные батареи - топливные элементы. В конце 60-х и в начале 70-х годов в Англии и США был разработан ряд опытных образцов электромобилей с энергосиловыми установками такого типа.

Так, в Англии был создан на базе нидерландского автомобиля ДАФ-44 электромобиль со смешанной системой питания от аккумуляторных батарей и от гидрозинно-воздушных топливных элементов с удельной мощностью 160 Вт/ Кг. При работе в режиме разгона такого электромобиля основная нагрузка ложится на аккумуляторные батареи, в других же режимах в работу вступают топливные элементы, заряжая батарею аккумуляторов.

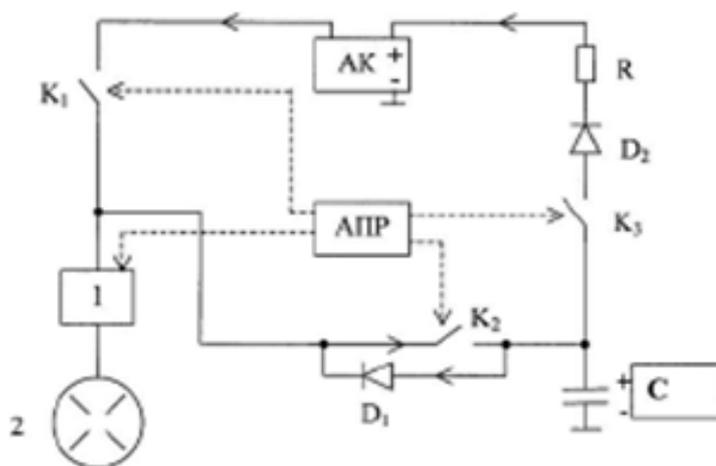
В США был изготовлен электромобиль на базе английского легкового автомобиля «Остин А-40» (Austin A-40) с комбинированной системой, включающей щелочные водородно-воздушные элементы и свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Согласно данным исследовательской эксплуатации запас хода такого электромобиля достигает 320 км.

По результатам опытной эксплуатации были сделаны выводы о целесообразности применения таких электромобилей в городских условиях. Также было отмечено, что существуют значительные возможности по совершенствованию комбинированной энергосистемы для городского электромобиля, которые позволяют снизить ее массу, повысить долговечность и отдачу энергии.



*Рис. 5. Электромобиль с комбинированным источником энергии топливных элементов и аккумуляторной батареи*

Для повышения эффективности рекуперации энергии используется комбинация, конденсатор большой емкости - аккумуляторная батарея. В устройстве повышение эффективности рекуперативного торможения в электромобилях вводится большая электрическая емкость, три автоматизированных переключателя, коммутирующие диоды и ограничивающее сопротивление.



*Рис.6 -Устройство повышения рекуперативного торможения в автомобилях*

Устройство содержит электродвигатель, который закреплен на оси колеса, аккумуляторную батарею АК, электрическую емкость С, автомат режимов АПР, три автоматизированные переключателя К1, К2 и К3, коммутирующие диоды D1, D2 и ограничивающий сопротивление R.

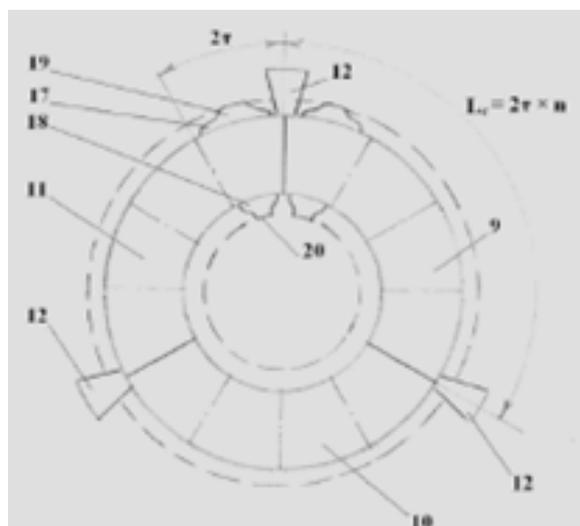
Устройство повышения эффективности рекуперативного торможения в автомобилях работает следующим образом. Во время торможения автоматизированный переключатель режимов АПР переводит электродвигатель в режим генерации электроэнергии, включает ключ К2, при этом конденсатор С заряжается от электрогенератора постоянного тока.

В рабочем режиме в начале перемещения при разгоне и на подъеме автоматизированный переключатель режимов АПР переводит электрогенератор в режим электродвигателя, включает ключ К1 и размыкает ключи К2 и К3, при этом электродвигатель поворачивает колесо с помощью электроэнергии, поступающей от аккумулятора АК и конденсатора С через коммутирующий диод D1.

На стоянке автоматизированный переключатель режимов АПР размыкает ключи К1, К2 и включает ключ К3, при этом аккумулятор АК подзаряжается от конденсатора С через ключ К3, коммутирующий диод D2 и ограничивающий сопротивление R. Коммутирующие диоды D1 и D2

пропускают ток от конденсатора С на электродвигатель или аккумулятор АК при условии, что напряжение на конденсаторе с превышает напряжение на аккумуляторе АК.

Для оптимизации массо-габаритных показателей электромобиля вместо использования электродвигателя с редуктором используются мотор-колеса. В электромеханической системе «мотор-колесо» статор по направлению действия крутящего момента выполнен секционированно с двусторонними боковыми активными поверхностями, активная длина секции кратная величине двойного полюсного деления, лобовые части обмоток на каждом двойном полюсном делении объединены в групповой скручень, ротор выполнен в форме катка с двумя боковыми дисками, которые размещены по обеим активным поверхностям статора, длина основы катка большая толщины статора на двойную величину промежутка между статором и ротором, а узлы крепления статора шасси размещены в зоне соединения секций.



*Рис.7. Вид одной из двух активных поверхностей статора*

Электромеханическая система «мотор-колесо» состоит из торцевого статора электрической машины, имеющий магнитопровод, навита из ленты

электротехнической стали. Вокруг магнитопровода заключена многофазная обмотка. Статор расположен коаксиально оси транспортной единицы и закреплен на ее шасси. Ротор жестко связан колесом, которое закреплено на оси транспортной единицы .

Статор выполнен по длине действия крутящего момента секционированно. Статор, который состоит из трех секций. Активная длина секции  $\zeta$  кратная величине двойного полюсного деления  $2\tau$ , то есть:

$$\zeta = m \cdot p \quad (1.1)$$

где  $m$  - длина полюсного деления,  $p$  - целое натуральное число.

Так, для указанного статора секции равновелики при  $p = 4$ . Возможно исполнение секций с различными значениями  $p$ . Крепление статора к шасси транспортной единицы осуществляется с помощью узлов крепления которые размещаются в зоне соединения секций. В магнитопроводе статора на боковых поверхностях и выполнены радиальные пазы в которые заключена обмотка. Таким образом, статор имеет две боковые активные поверхности и .

Лобовые части обмоток в каждом двойном полюсном делении  $2\tau$  объединены в групповые. Ротор выполнен в форме катка с основанием и двумя боковыми дисками и расположены на обоих активных поверхностях статора . Длина основания катка больше толщины статора в двойную величину промежутка между статором и ротором.

При подключении трехфазной кольцевой обмотки до источника трехфазного напряжения на боковых активных поверхностях статора и в воздушных промежутках бы возникало вращающееся электромагнитное поле, под действием которого в боковых дисках, в роторе приводятся индуцированные токи. В результате взаимодействия вращающегося электромагнитного поля статора и индуцированных токов ротора, возникает электромагнитный момент, под действием которого ротор, жестко связан с колесом, совершает вращательное движение по направлению действия электромагнитного момента.

### 1.3 Анализ типовой тахограммы

Расчет оптимальной мощности приводного двигателя транспортного средства - комплексная многофакторная задача. Следует обеспечить определенный компромисс между динамическими свойствами автомобиля, весом и стоимостью компонентов и экономичностью транспортного средства. Рассчитаем необходимые параметры привода исходя из требований, предъявляемых к динамике транспортного средства.

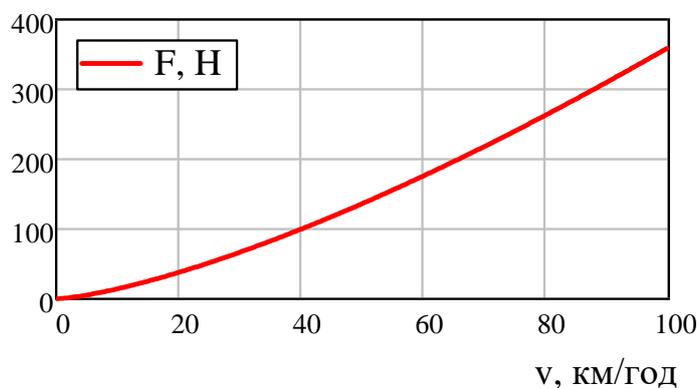
Во-первых, проанализируем зависимость силы сопротивления движению транспортного средства от скорости. Известно, что сила имеет две основные составляющие - и, что определяется сопротивлением трения качения, и та, что определяется аэродинамическим сопротивлением. Обе компоненты зависят от многих факторов, главными из которых являются форма кузова и скорость движения транспортного средства. Например, для седана среднего класса результирующая зависимость может быть описана уравнением :

$$F_{res} = k_f \cdot v^\alpha, \quad (1.2)$$

где  $v$  - линейная скорость автомобиля, м / сек;

$k_f = 3,43$ ,  $\alpha = 1,4$  - вспомогательные коэффициенты.

Зависимость (1.1) показана на рис. 8.



*Рис.8 - Зависимость сопротивления движению автомобиля от скорости*

При скорости 100 км / ч результирующая мощность, необходимая на преодоление сопротивления движению равна

$$P_{100} = F_{\text{рез}} \cdot v = 350 \cdot \frac{100}{3,6} = 9.722 \text{ (кВт)} \quad (1.3)$$

Динамическая составляющая определяется через ускорение и вес транспортного средства:

$$F_{\text{dyn}} = m_{\text{vehicle}} \frac{dv}{dt} \quad (1.4)$$

где  $m_{\text{vehicle}}$  - вес транспортного средства, кг.

Результирующее усилие, которое должен обеспечить привод транспортного средства, определяется приложением указанных составляющих.

Проведем исследование зависимости мощности и усилия, которое развивает транспортное средство при движении в городском цикле. Выходные параметры моделирования предоставлены в таблице 1. 1.

*Таблица 1.1 - Параметры моделирования динамических параметров транспортного средства в мисском цикле*

№	Параметр	Ед. изм	значение	Примечание
1	Вес автомобиля	кг	1350	с учетом дополнительных компонентов
2	Расстояние движения	м	23.262	типичная для городского цикла
3	Максимальная скорость	км/год	97.4	
4	Время ускорения 100 км/год	с	12	
5	Время торможения 100 км/год до зупинки	с	12	

Будем считать, что происходит постепенное торможение, так как при аварийном торможении накопленная энергия рассеивается в механической тормозной системе, и, таким образом, эта мощность не влияет на требования к приводу. На данном этапе пренебрежем также потерями в механической передаче - требования к приводу рассчитаем относительно усилия на колесе (сведем все величины к постепенному движению). Исходя из причиненного расстояния, рассчитаем участка ускорения и торможения. Темпы ускорения и торможения зададим линейными. Будем считать сводную массу транспортного средства постоянной. По указанным формулам рассчитаем усилия и мощность, которые должен развивать привод транспортного средства.

Результаты моделирования представлены на рис. 11.

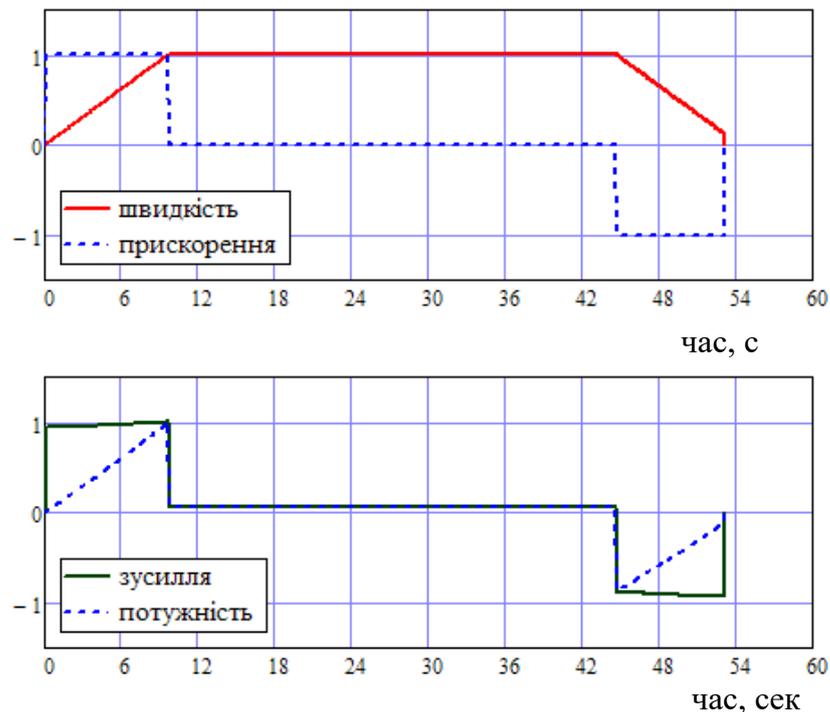


Рис.9 – Фрагмент тахограммы в типичном городском цикле результатами расчета усилия и мощности.

Результаты моделирования представлены в относительных единицах, базовых величины приняты максимальные соответствующие значения скорости, ускорения, усилия и мощности. Итак, для представленной тахограммы, максимальное значение усилия равно 4,4 кН; максимальное значение мощности - 99,6 кВт. Наиболее «тяжелым» местом тахограммы есть участок в конце разгона - при условии постоянства динамической составляющей усилия при ускорении, статическая составляющая, связанная с сопротивлением движению, в этом месте достигает максимума.

Между тем, во время установившегося движения привод развивает усилия только 263 Н и мощность до 6 кВт. Эквивалентная мощность (среднее значение мощности в цикле) составляет 20,9 кВт; эквивалентное значение усилия (среднее геометрическое значение) 2,5 кН.

Анализ представленных диаграмм и расчетов свидетельствует о высоком соотношении усилия и мощности в динамических режимах до эквивалентных значений. Соотношение максимальной мощности к эквивалентной равно примерно 5: 1, усилий  $\approx$ 2: 1. Для короткой дистанции соотношения будут меньше, для загородного движения - больше. Такие соотношения приоритеты выбора типа электропривода гибридного транспортного средства и формирования его механических характеристик: следует выбирать электропривод с максимально высокой перегрузочной способностью; целесообразно двухзонное регулирование скорости или применения многоскоростных двигателей со сложными обмотками; следует формировать гиперболическую механическую характеристику электропривода.

Запас кинетической энергии транспортного средства при максимальной скорости равен примерно 444 кДж. Это значение является базовым для выбора энергоемкости накопителя энергии. Меньшие значения «энергетического окна» не позволят утилизировать энергию для следующего ускорения. Большие значения позволят выполнить несколько циклов разгона-торможения или обеспечить длительную работу ГТЗ в режиме питания от электрического накопителя.

В рассматриваемом случае мощность в режиме ускорения и торможения приняты равными. Соответственно, средняя мощность в рекуперативном режиме равна 48 кВт. Это предъявляет жесткие требования к накопителю энергии: не все типы аккумуляторных батарей могут обеспечить интенсивную подзарядку. Например, для свинцово-кислотных аккумуляторов, соотношение максимального тока разряда, то ток заряда примерно 10: 1, для литий-ионных батарей - 5: 1. Выбор аккумулятора такой емкости, чтобы нужная мощность заряда не превышала максимально допустимое значение, может означать слишком большие габариты и вес.

Следует предусмотреть использование комбинированных схем, например, в сочетании с ультраконденсатором, для которых соотношение мощностей заряда / разряда примерно равно 1: 1.

## **2. Исследование батареи в составе электромобиля**

## 2.1 Характеристики накопителей электрической энергии

Сформулируем требования, предъявляемые к источнику электрической энергии, установленного на автомобиль:

- высокая удельная энергоемкость (источник должен быть способен аккумулировать как можно больше энергии, а весить как можно меньше);
- высокая удельная мощность (источник должен обеспечить энергией автотранспортное средство в любом динамическом режиме, что практически реализуется)
- высокая удельная мощность при заряде (источник должен быть способен накопить всю энергию рекуперативного торможения)
- большой ресурс (источник должен быть способен перезаряжаться как можно большее число раз);
- высокий КПД (источник должен иметь как можно низкие внутреннее сопротивление для уменьшения потерь в самой батарее при разряде-заряде и температуру при его работе)
- взрыво- и пожаробезопасность (источник не должно стать причиной аварии или усилить ее последствия)
- низкая токсичность (при возникновении аварийной ситуации источник не должно усиливать ее последствия отравляющим действием)
- ценовая доступность;
- температурный режим (источник должен сохранять свои эксплуатационные качества во всем диапазоне температур снаружи автомобиля соответствии с климатическими условиями).

Выбор типа аккумулирующего элемента для транспортного средства достаточно сложное научно-техничко-экономическое задание. Результат его решения напрямую связан с доступностью и конкурентоспособностью будущего транспортного средства. В определенной степени эта задача может быть упрощено с помощью анализа рынка гибридных машин и установленных на них источников электроэнергии.

Мощные производители тратят значительные средства на исследования и проектирования, ожидая получить прибыль, а это возможно только при перспективе востребованности продукции, обеспечивается в том числе и оптимальными техническими и эксплуатационными характеристиками компонентов продукции.

Проанализируем типы аккумулирующих элементов автомобилей, предлагаемых в 2012 году (и некоторых планируемых к выпуску) крупнейшими (в 2010 году) компаниями-производителями (табл. 1.2).

Таблица 1.2 Характеристики аккумуляторов гибридных автомобилей

Модель	Тип аккумулятора
Toyota Prius Five (Two, Three, Four)	Герметичный никель-металлогидридный (Ni - MH), 6.5 А·ч, 201.6 В
Toyota Prius Plug - in Hybrid Toyota Prius Plug - in Hybrid Advanced Prius	Литий-ионный
Toyota Prius V Five (Two, Three)	Герметичный никель-металлогидридный
Toyota Prius с Four (One, Two, Three)	Герметичный никель-металлогидридный
Toyota Camry Hybrid	Герметичный никель-металлогидридный
Toyota Highlander Hybrid	Герметичный никель-металлогидридный
Toyota RAV4 EV	Литий-ионный (Li - Ion) 41,8 кВт·ч
General Motors Chevrolet Volt	Т-образный литий-ионный 16,5 кВт·ч
General Motors Cadillac Escalade Hybrid	никель-металлогидридный
Volkswagen Touareg Hybrid	никель-металлогидридный
Volkswagen Golf TDI Hybrid	никель-металлогидридный
Volkswagen Jetta 2013	Литий-ионный 1.1 кВт·год
Hyundai Sonata Hybrid	Литий-полимерный
Ford C - Max Hybrid	Литий-ионный 1.4 кВт·год
Ford C - MAX Energi	Литий-ионный 7.6 кВт·год
Ford Fusion SE Hybrid	Гибридный литий-ионный
Ford Focus Electric	Литий-ионный с жидкостным охлаждением 23 кВт·год
Ford Escape Hybrid	никель-металлогидридный
Honda Civic Hybrid	Литий-ионный
Honda CR - Z	никель-металлогидридный (Ni - MH), 5.75 А·год, 100.8 В
Honda Insight	никель-металлогидридный (Ni - MH), 5.75 А·год, 100.8 В
Kia Optima Hybrid	Литий-полимерный
KIA Forte LPI Hybrid	Литий-ионный с полимерным электролитом
Kia Ray	Литий-ионный
BMW ActiveHybrid 3	Литий-ионный

Из таблицы видно: выбор крупнейших компаний-производителей на данный момент делится примерно поровну между никель-металлогидридным и литий-ионным типами аккумулирующих элементов силовой установки. Дальнейший анализ при выборе лучшего типа среди вторичных химических источников тока (аккумуляторов) целесообразно проводить, сравнивая именно никель-металлогидридный и литий-ионный.

Сравним основные показатели выбранных типов (табл. 1.3).

Таблица 1.3-. Сравнительные параметры накопителей энергии

Параметры аккумуляторной батареи	NI/MH	Li - ion
Стоимость	Средняя	Висока
Удельный энергетическая емкость	60—110	110-260
Внутреннее сопротивление, Ом	0,5—0,2	0,15—0,25
Потребляемая мощность, Вт/кг	500	800—3000
Число циклов заряд / разряд	300—500	500—1000
Чувствительность к перезаряда	Средняя	Висока
Время быстрого заряда, год.	14	60—70 хв
Макс. ток разряда, А	20 С	20 С
Саморазряд за месяц при 20°С, %	20	2-5
Напряжение максимально в ячейке, В	1,85	4,18—4,20
Напряжение минимальная в ячейке, В	1,37	2,5—2,75
Диапазон рабочих температур,°С	-60 - +55	-20 - +60
ККД, %	60—90	
Производитель (пример)	Sanyo, Rayovac, Fujicell, AccuPower, Maha, Yuasa, Gold Peak, CDR King, Turnigy	Sony, HYPERION, Эконт, Walkera, A123 Systems

Практически по всем основным показателям литий-ионные аккумуляторы превосходят никель-металлогидридные. Цена лидирующего типа не относится к его преимуществам. Однако по некоторым прогнозам стоимость литий-ионных аккумуляторных батарей, используемых в электромобилях, снизится

примерно на треть уже к 2017 году. Это произойдет за счет дальнейшего совершенствования технологии производства, повышения поставок лития и росту сжиг продаж. К такому выводу пришли аналитики компании Pike Research, которые резюмировали свои выводы в опубликованном в начале 2012 года докладе. Анализируя сообщения, касающиеся новых разработок относительно литий-ионных аккумуляторов, на рынке стоит ждать устройств с более высокими энергетическими и эксплуатационными показателями, а именно с увеличением: количества рабочих циклов почти до 7000, удельной мощности до 100 кВт / ч, удельной энергоемкости до 525 Вт · ч / кг.

В табл.1.4 приведены некоторые производители литиевых аккумуляторов (LI - ION, LI - PO, LIFEP04) .

Таблица 1.4.- Производители аккумуляторов

Название производителя	Место расположения	Название производителя	Месторасположение
A123		Huanyu	Китай
Advanced Battery Factory	Китай, Гуандун	K2 Energy Solutions	США, Невада
Aleees (Advanced Lithium Electrochemistry Co.)	Тайвань	Kayo	Китай, Шэньчжэнь
Amperex Technology Limited (ATL)	Китай, Гонконг	Kokam	Корея
Baoding Fengfan New Energy Co.	Китай, Хэбэй	Optimum	Китай, Гуандун
BYD	Китай	PHET (Pihsiang Energy Technology)	Тайвань
CALB (China Aviation Lithium Battery Co., Ltd)	Китай, Лоян	PSI (Phoenix Silicon International Corp.)	Тайвань
CENS Energy - Tech	Китай, Ханчжоу	SAFT	Франция
Compact Power (Підрозділ LG Chem)	США, Мичиган	Hipower	Китай

Продовження табл.1.4

EiG	Корея	Tenergy	США
Electrovaya	Канада, Онтарио	Thunder Sky / Winston Battery	Китай, Шэньчжэнь
GAIA («LTC» — Lithium Technology Corporation)	Нордхаузен	Valence	США, Техас
Gold Peak	Китай, Гонконг	Headway	Китай, Шэньчжэнь
<a href="#">Hong kong tac industrial co., ltd</a>	Китай, Гонконг		

Значительно менее развит альтернативный подход при выборе аккумулирующего элемента транспорта - использование ионисторов (суперконденсаторов).

Среди продукции ведущих мировых производителей автотранспортных средств встречаются единичные решения с применением суперконденсаторов, например Honda FCX Clarity, в которой в подсистеме «разгон-торможение» применен ионистор собственной разработки (суперконденсатор без традиционных обкладок).

Фирмами Hyundai Motor и «Тролза» выпускаются автобусы с питанием от ионисторов.

В 2011 году компанией Solaris представлено автобус Urbino 18 DIWA с передовой дизель-электрической гибридной силовой установкой параллельного типа на суперконденсаторах.

В Российской Федерации разрабатывается проект автомобиля, в котором используется суперконденсатор как основное средство для накопления электрической энергии. Сами эти суперконденсаторы пока не выпускаются серийно и разрабатываются параллельно с автомобилем.

Основные показатели современных суперконденсаторов приведены в табл. 3.9.

Таблица 1.5.- Характеристики ионисторов

Параметры ионисторов	Значение
Стоимость	Высокая
Удельный энергетическая емкость, Вт.год/кг	2-12
Внутреннее сопротивление, Ом	0,006—0,35
Потребляемая мощность, Вт/кг	1500-12000
Число циклов заряд / разряд	больше 100000
Время заряда, хв	15 до 40
Макс. ток разряда, А	до 5000
Саморазряд	Очень высокий, 1 мкА
Диапазон рабочих температур, °С	-50... +70
Эффективность, %	>90
Производитель (пример)	ЭСМА, ИНКАР-м, Epcos, Maxwell

Сравним параметры суперконденсаторов с параметрами литий-ионных аккумуляторов. Оба эти типа достаточно дороги.

К отличительных преимуществ литий-ионных аккумуляторов можно отнести:

- очень высокую удельную энергоемкость;
- низкий саморазряд.

К отличительных преимуществ литий-ионных аккумуляторов можно отнести:

- высокую удельную мощность;
- очень большое количество циклов заряд-разряд;
- низкое внутреннее сопротивление.

Отличительный недостаток - достаточно высокий саморазряд.

По всем остальным показателям принципиальных отличий практически нет.

Оценить такие энергетические параметры современных суперконденсаторов, как удельная энергетическая емкость и удельная мощность и сравнить их с вторичными химическими источниками тока можно с помощью диаграммы (рис.10).



Рис.10 Диаграмма энергетических показателей для различных типов батарей

На диаграмме область «Литий-ионные очень большой мощности» соответствует устройствам, разработанным в последнее время, которые только начинают выходить на рынок.

Следует отметить, что прогресс в развитии суперконденсаторов также существует, но не такой интенсивный, как в химических источниках тока. В 2011 году группой ученых во главе с Бором Джангом (Bor Jang) из компании Nanotek Instruments на основе графеновой пленки создан новый тип суперконденсатора, что имеет плотность хранения энергии 85,6 Вт · ч. / Кг при комнатной температуре и 136 Вт · ч / кг - при температуре 80 ° С.

В табл. 1.6 приведены некоторые производители суперконденсаторов.

Таблица 1.6 - Характеристики суперконденсаторов

Название производителя	Место расположения	Название производителя	Месторасположение
------------------------	--------------------	------------------------	-------------------

ЗАТ "ЭСМА"	м. Троицк Московской обл. (Россия)	Power Systems	Япония
ЗАТ "ЕЛИТ"	м. Курск (Россия)	Elna	США
ТОВ "Технокор"	м. Москва (Россия)	Maxwell Technologies	США
НВО "ЭКОНД",	м. Москва (Россия)	NessCap	Канада
АТ "Плескава" (за лицензією НВО "ЭКОНД")	м. Псков (Россия)	LS Cable	Корея
ВАТ "НДІ "Гириконд"	м. С-Петербург (Россия)	Bat Scap	Франция
ВАТ РКК "Енергія"	м. Корольов (Россия)	Evans Capacitor	США
ВАТ "Енергія" (розробка ЗАТ "Элтон, виробництво ЗАТ НПП "Инкар-м" (г.Королев)	м. Єлец, Липецкая обл. (Россия)	AVX	США
NEC - Tokin	Япония	Cooper Bussmann, колишня Cooper Electronic Technologies	США
Nippon - Chemicon	Япония	Epson	Япония
Panasonic	Япония		

Выбор между литий-ионным аккумулятором и суперконденсатором делать, исходя из предпочтений той или иной цели гибридизации легкового транспортного средства после избрания его базовой модели. Решающую роль видграют необходимые энергоёмкость и мощность, которые зависят от внешних и внутренних факторов, возникающих при управлении автомобилем. В конце концов, решающую роль может сыграть конечная масса накопительного устройства. При определенных условиях достичь необходимой энергоёмкости можно увеличив число элементов в ёмкостном накопителе в

ущерб его массо-габаритным показателям. Необходимую мощность литий-ионной батареи можно получить также увеличив число аккумулирующих элементов в ущерб массо-габаритным показателям.

При конкретных условиях выбора можно достичь компромисса, скомбинировав работу обоих типов накопителей. Однако этот подход может иметь свои нюансы в виде необходимости разработки и введения дополнительного устройства.

## 2.2. Параметры батарей

В качестве накопителей энергии в силовой установке могут использоваться кислотные, литиевые и щелочные никель-кадмиевые аккумуляторы. Ниже представлены преимущества и недостатки накопителей энергии.

Литий-ионные аккумуляторы.

преимущества:

- высокая энергетическая плотность;
- низкий саморазряд;
- отсутствие эффекта памяти;
- простота обслуживания;
- низкий удельный вес.

недостатки:

- аккумуляторы Li-ion подвержены разрушению при перезаряде или перегреве. Для борьбы с этим явлением все бытовые аккумуляторы обеспечиваются встроенной электронной схемой, которая предотвращает перезаряд и перегрев вследствие слишком интенсивного заряда;

- при неосторожном обращении могут иметь более короткий жизненный цикл по сравнению с другими типами аккумуляторов.

Глубокий разряд полностью выводит из строя литий-ионный аккумулятор; оптимальные условия хранения Li-ion аккумуляторов достигаются при 40% -м заряде от емкости аккумулятора при температуре около 5 градусов

Цельсия. При этом низкая температура является более важным фактором для малых потерь емкости при длительном хранении. Средний срок хранения литиевого АКБ составляет в среднем 36 месяцев, хотя может колебаться в интервале от 24 до 60 месяцев;

суровые условия зарядки литий-ионных аккумуляторов затрудняют их использование в альтернативной энергетике. Это связано с тем, что ветрогенераторы и солнечные панели не в состоянии обеспечить постоянный ток на всем протяжении цикла заряда;

литиевые аккумуляторы стареют, даже если не используются.

Никель-кадмиевые аккумуляторы.

преимущества:

- могут работать практически при любых погодных условиях;
- могут заряжаться даже при низких температурах;
- без проблем выдерживают более тысячи циклов заряда / разряда и легко восстанавливаются при снижении емкости и после длительного хранения;
- короткое время заряда.

недостатки:

- относительно небольшая, по сравнению с аккумуляторами других типов, энергетическая плотность (отношение емкости к массе) и, соответственно большой вес и габариты при одинаковой емкости;

- Ni-Cd аккумуляторы содержат кадмий "недружественный" к окружающей среде, и поэтому требуют специальной утилизации;

- высокий саморазряд. За первые сутки после заряда они теряют до 10%, а за месяц - до 20% запасенной энергии;

- Ni-Cd аккумуляторы подвержены эффекту памяти.

Кислотные аккумуляторы.

преимущества:

- широкая распространенность технологии и небольшая стоимость;
- хорошая переносимость мощностных нагрузок;

- относительная дружелюбность к окружающей среде - вторичная переработка кислотных аккумуляторов хорошо отработана.

недостатки:

- низкая плотность энергии в аккумуляторе, в связи с чем вес батареи выше, чем в большинстве других батарей,

- проблема толерантности к глубокому разряду - при разряде более 80% резко снижается продолжительность жизни батареи;

- проблема обслуживания для вентилируемых батарей - нужен постоянный контроль уровня электролита раз в неделю, зарядка в специальном хорошо проветриваемом помещении;

- при заряде теряется до 30% затраченной электроэнергии;

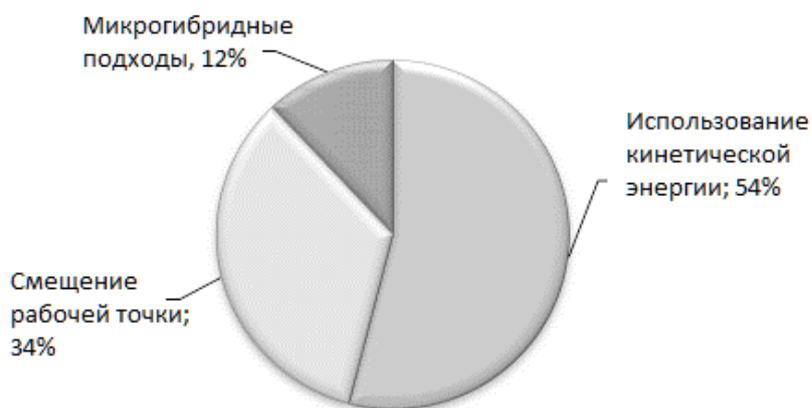
- нельзя оставлять сильно разреженную батарею на морозе

- трудно прогнозировать выход из строя аккумулятора

- при больших токах разряда стоит проблема неполной одномоментной отдачи заряда батарей.

## **2.3 Модель гальванической батареи**

Батарея – основной элемент как гибридного, так и строго электрического транспортного средства. Другие компоненты, такие как электрические двигатели, электрические преобразователи энергии различных типов и даже двигатель внутреннего сгорания предположительно достигают своей максимально возможной эффективности. Их дальнейшее усовершенствование едва возможно в ближайшем будущем. Кроме того, для текущих характеристик накопителей энергии, которые в основном представлены гальваническими батареями, улучшение других электрических компонентов нецелесообразно. В



гибридном транспортном средстве (ГТС) любой топологии, обычно батарея ограничивает экономию топлива и динамику ТС.

Для подтверждения этого, мы рассмотрели источники экономии топлива и их потенциал. ГТС экономит топливо, используя три основных процесса: рекуперация кинетической энергии на протяжении торможения ТС, улучшение рабочего режима двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и отключение двигателя на протяжении остановок (микро гибридные технологии).

Использование или рекуперация кинетической энергии означает ее улавливание на протяжении торможения (иначе она рассеивается, как тепло на тормозном диске) и ее хранение в батарее или другом устройстве, таком как суперконденсатор или супермаховик. Этот подход обеспечивает лучшую экономию топлива для диаграммы движения с частыми пусками и остановками. К тому же, это может быть выполнено, если у электрической части силовой цепи достаточно номинальной мощности для обеспечения необходимого торможения. В большинстве современных ГТС лишь небольшая часть кинетической энергии рекуперирована, в основном, ограниченная скоростью заряда батареи.

*Рисунок 11. Потенциал основных источников экономии топлива*

Максимальное количество сэкономленного топлива, обеспечиваемое этими технологиями, равно 100%. Итак, рекуперация кинетической энергии

обеспечивает наибольшую долю максимально возможного сэкономленного топлива, но в тоже время, этот принцип требует использования батарей с более высокими номинальными параметрами, особенно, тока заряда.

На сегодняшний день, электрические двуслойные конденсаторы или ультраконденсаторы появились на рынке и стали довольно дешевыми. Их применение для рекуперации энергии в ГТС очень многообещающе, но необходимость стабилизации напряжения делает это решение дорогостоящим. Итак, в ближайшем будущем, преобладающим накопителем энергии останутся гальванические батареи.

Все стратегии энергосбережения для электрических ТС основаны на определенной стратегии управления состоянием заряда батареи (SOC). Для их использования необходимо знать режим работы батареи, факторы ограничивающие ее работу на протяжении заряда/разряда. Мы провели исследования для расчета эффективности энергетических стратегий управлений и проверки характеристик ТС.

Физические явления, происходящие в гальванических батареях, очень сложны и, в основном, описываются нелинейными уравнениями. Для расчетов ГТС модель батареи должна быть упрощена, насколько это возможно. Таким образом, были приняты некоторые допущения:

- внутреннее сопротивление постоянно на протяжении циклов заряда и разряда, и не изменяется с изменением амплитуды тока;
- все необходимые коэффициенты уравнений и параметры модели извлекаются из характеристики разряда, и принимаются такими же для режима заряда;
- температура не влияет на характеристики батареи;
- не представлен саморазряд батареи;
- отсутствует эффект памяти.

Основные уравнения. Модель батареи, представленная ниже, отражает все электрические режимы работы для нескольких типов накопителей энергии. Уравнения достаточно точно описывают динамику напряжения с изменением

тока и учитывают напряжение разомкнутого контура (OCV), как функцию состояния заряда батареи (SOC). Поляризованное напряжение добавлено в уравнения для повышения точности моделирования работы при разомкнутом контуре.

Напряжение батареи описывается следующим уравнением:

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} \cdot it - R \cdot i + A \exp(-B \cdot it) - K \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* \quad (2.1)$$

где  $V_{batt}$  – напряжение батареи, В;

$E_0$  – постоянное напряжение батареи, В;

$K$  – поляризованная постоянная (В/(А час)) или поляризованное сопротивление (Ом);

$Q$  - ёмкость батареи, А час;

$it$  – действительный заряд батареи, А час;

$A$  – амплитуда экспоненциальной зоны, В;

$B$  – инверсная постоянная времени экспоненциальной зоны, А час<sup>-1</sup>;

$R$  - внутреннее сопротивление, Ом;

$i$  – ток батареи, А;

$i^*$  – отфильтрованный ток, А.

Ограничения в модели:

- минимальное напряжение ненагруженной батареи 0 В, а максимальное составляет  $2 \times E_0$ ;
- минимальная емкость батареи 0 А час, а максимальная  $Q$ .

Уравнение содержит компонент падения напряжения, вследствие протекания отфильтрованного тока через поляризованное сопротивление. Этот член уравнения позволяет моделировать медленное уменьшение напряжения, в зависимости от амплитуды тока, после того, как оно достигнет максимального. Использование отфильтрованного тока позволяет исключить алгебраические обратные связи - типичную проблему моделирования батарей.

Еще одна проблема - OCV изменяется нелинейно с изменением SOC. Этот эффект моделируется с помощью, так называемого, поляризованного

напряжения. Последний элемент уравнения представляет собой нелинейную функцию напряжения батареи от тока разряда и действительного заряда.

Экспоненциальная зона разряда в уравнении 1 типична для Li-Ion батарей. У других типов батарей (Lead-Acid, NiMH и NiCd) присутствует явление гистерезиса между зарядом и разрядом, не зависящий от их действительного SOC. Падение напряжения, обусловленное этим феноменом, может быть рассчитано при помощи нелинейной динамической системы, показанной ниже:

$$\text{Exp}(t)' = B \cdot |i(t)| \cdot (-\text{Exp}(t) + A \cdot u(t)) \quad (2.2)$$

где  $\text{Exp}(t)$  – напряжение экспоненциальной зоны, В;

$i(t)$  – ток батареи, А;

$u(t)$  – режим заряда или разряда.

Напряжение экспоненциальной зоны зависит от его начального значения  $\text{Exp}(t_0)$  и режима работы (заряда или разряда). Необходимо учитывать, что описание процесса заряда и разряда зависит от типа батареи. Соответствующие уравнения для различных типов батарей представлены ниже.

Таблица 1.7. Функции падения напряжения для различных типов батарей.

Тип батареи	Уравнения для режимов заряда и разряда
Lead-Acid	<p>Разряд</p> $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + \text{Exp}(t)$ <p>Заряд</p> $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Exp}(t)$
Li-Ion	<p>Разряд</p> $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A \exp(-B \cdot it)$ <p>Заряд</p> $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \exp(-B \cdot it)$
NiMH and NiCd	<p>Разряд</p> $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + \text{Exp}(t)$ <p>Заряд</p> $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{ it  - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Exp}(t)$

Используя эти уравнения и взаимозависимость между компонентами напряжения и током батареи, мы можем составить универсальную модель батареи (смотри рис.12).

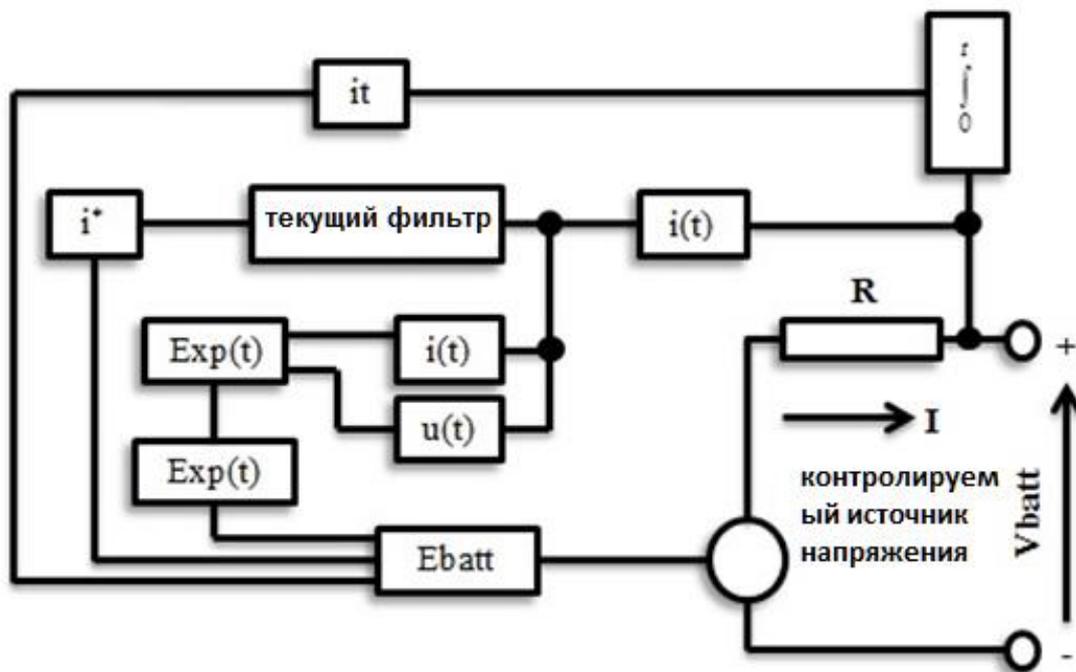


Рис.12. Модель батареи

Определение коэффициентов уравнения. Для определения коэффициентов уравнения и параметров модели, необходимо измерить три точки характеристики разряда батареи: напряжение полного заряда ( $V_{full}$ ), конец экспоненциальной зоны (напряжение и емкость), конец номинальной зоны (напряжение и емкость), как показано на рисунке 13.

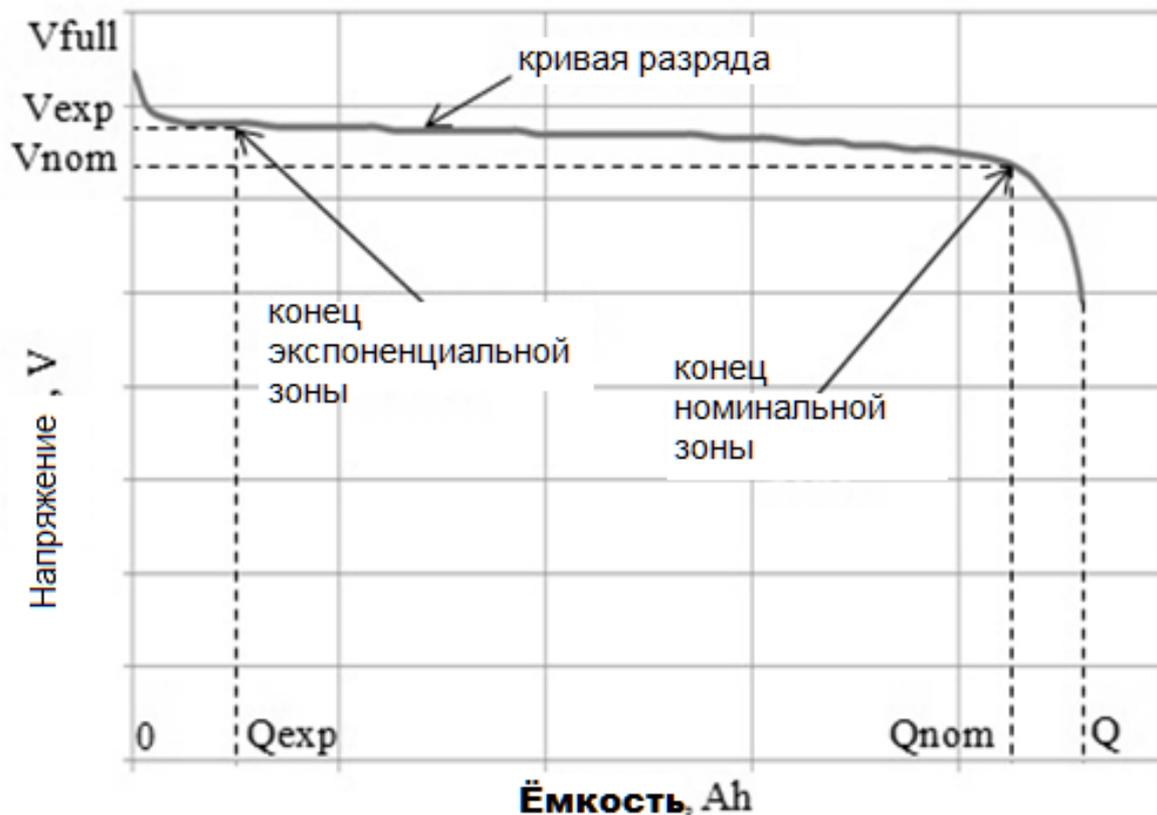


Рисунок 13. Типичная характеристика разряда

Экспоненциальная часть уравнений рассчитывается согласно таким выражениям:

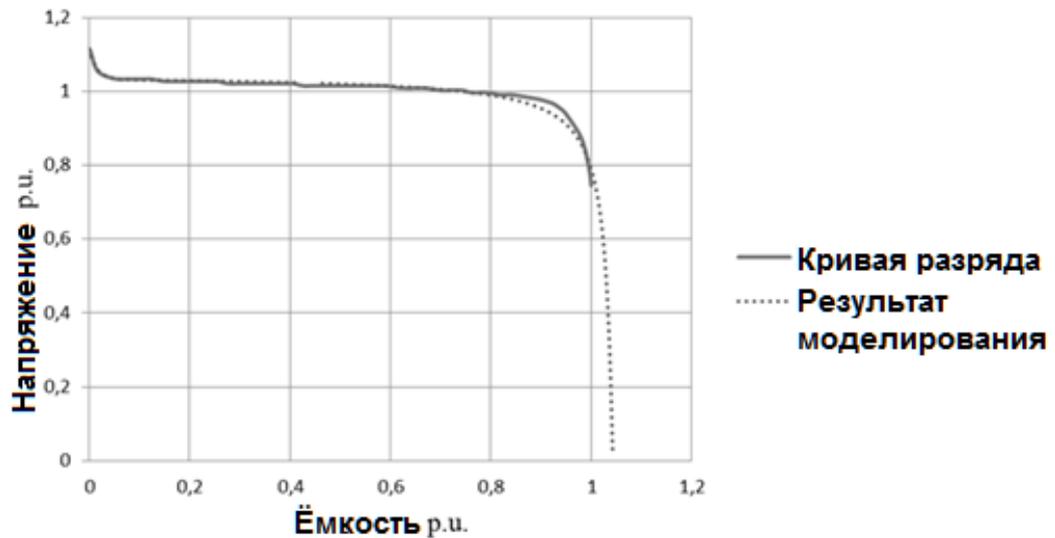
$$A = V_{full} - V_{exp}, \quad (2.3)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}}. \quad (2.4)$$

Коэффициент  $K$  рассчитывается следующим образом:

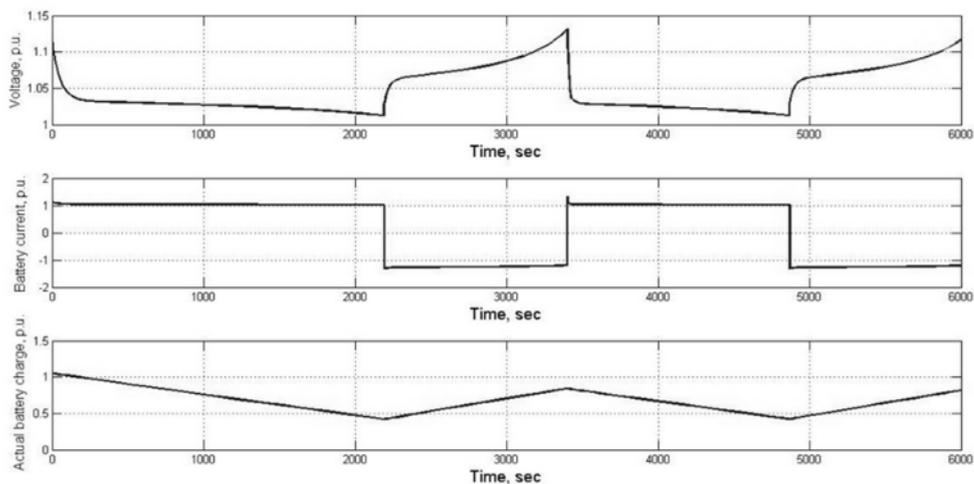
$$K = \frac{[V_{full} - V_{nom} + A(\exp(-B \cdot Q_{nom}) - 1)] \cdot (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (2.5)$$

Моделирование. С помощью уравнений (1-5) и структуры, была смоделирована работа типичной Lithium-Ion батареи. Зависимости напряжения батареи от емкости – кривая, полученная при моделировании и экспериментально – приведены ниже.



*Рисунок 14. Результаты моделирования*

Как видим, модель довольно точно отображает процесс разряда. Динамический режим работы батареи на протяжении нескольких циклов заряда/разряда показан на рисунке ниже. Кривые построены в относительных единицах.



*Рисунок 15. Динамические процессы на протяжении циклов заряда/разряда*

Структура и зависимости отражают связь между состоянием заряда батареи, ее напряжением и током в различных режимах работы. Таким образом, модель может быть использована для моделирования процессов обмена энергией как в гибридном, так и чисто электрическом ТС, расчета необходимых параметров для достижения требуемых характеристик экономии топлива или динамики ТС и для других целей.

Для того чтобы улучшить описание режимов работы батареи, необходимо рассмотреть зависимость емкости батареи от амплитуды тока. Это особенно важно, когда используются Lead-Acid батареи.

## **2.4 Характеристики зарядки батареи электрических транспортных средств**

В настоящее время приняты следующие стандарты зарядки электромобилей:

1. Уровень 1 (медленная зарядка) подразумевает зарядку переменным током транспортного средства, например, 120 В / 16 А для зарядки 1,92 кВт; время зарядки  $t_c$ : ~ 10 ч.

2. Уровень 2 (стандартная зарядка) подразумевает зарядку переменным током транспортного средства, например, 208-240 В / 12А-80А для зарядки 2,5-19,2 кВт;  $t_c$ : ~ 6-8 ч.

3. Уровень 3 (быстрая зарядка) подразумевает зарядку постоянным током; минимальные требования к зарядке отсутствуют, но максимальный ток 400А и 240 кВт;  $t_c$ : 30 мин.

Места парковки автомобилей преобладают на работе и дома, в то время как совершение покупок происходит только в рабочее время. Кажется очевидным, что зарядка уровня 1 идеально подходит для зарядки автомобиля дома (например, ночью). Зарядка 2-го уровня кажется хорошим решением, когда пользователь находится в месте в течение длительного времени (например, на работе), тогда как зарядка 3-го уровня решение для быстрой зарядки по более высоким ценам, когда пользователь не останавливается надолго. Есть альтернатива для смены батарей. Это решение подразумевает, что зарядная станция способна хранить достаточное количество батарей для разных моделей автомобилей.

Например, Nissan Leaf питается от литиево-ионного аккумулятора мощностью 24 кВт. С помощью зарядного устройства, можно полностью зарядить за 8 часов от источника питания 220 В / 30А.

Ожидается, что аккумулятор сохранит от 70% до 80% мощности после 10 лет эксплуатации при условии зарядки уровнями 1/2. С другой стороны, 80% его емкости может быть заряжена за 30 минут на зарядном устройстве 3-го уровня .

Для Nissan Leaf аккумулятора хватает на 160 км при вождении в городе и с выключенным кондиционером. Однако на шоссе - на 90 км / ч и с кондиционером - аккумулятора хватит на 110 км. Принимая во внимание движение зимой - со скоростью 25 км /ч и нагрев - аккумулятора хватит на 100 км и в случае движения со скоростью 10 км / ч с включенным кондиционером, батареи хватит на 70 км.

### **3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

#### **3.1. Критерии, факторы и ограничения оптимального размещения зарядных станций**

При планировании зарядной инфраструктуры для электромобилей необходимо учитывать множество факторов и ограничений. Во-первых, необходимо исходить из того, кто и для чего собирается установить зарядные станции. Это может быть частная организация – владелец сети зарядных станций для электромобилей. Ее целью, вероятнее всего, является максимизация прибыли при минимальных затратах. Такая организация постарается разместить станции в местах максимального спроса, наиболее удобных для вероятного пользователя. Если же развертыванием инфраструктуры занимаются муниципальные органы власти, то лица, принимающие решение, должны взять в расчет логистические и социальные факторы. Путем установки зарядных станций в соответствующих местах можно в какой-то мере перенаправлять городской трафик, разгружать проблемные участки дорог, стимулировать развитие отдельных районов города.

Существенным ограничением является доступность точек подключения к электрической сети. Трансформаторные подстанции должны располагаться как можно ближе к предполагаемому месту установки зарядной станции, что позволит сократить потери в питающей линии и снизит затраты на организацию подвода.

И в любом случае, главным ограничением является стоимость развертывания сети зарядных станций. Будь-то у муниципального или частного предприятия ресурсы не бесконечны, оно может позволить себе установить только определенное число зарядных станций и не больше. Тем не менее, будем считать, что зарядных станций будет установлено столько, чтобы удовлетворить спрос на зарядку электромобилей с учетом их прогнозируемого количества. Т.е. количество зарядных станций или точек подключения, а также их пропускная способность должны быть достаточными для зарядки всех имеющихся в городе электромобилей.

Ограничим область исследований станциями медленного заряда, т.е. станциями, работающими на переменном токе и выдающими мощность порядка 7 кВт. В таком режиме электромобиль может полностью зарядиться за 3-4 часа. Владельцы могут заряжать свои электромобили в таком режиме ночью, когда автомобиль находится на придомовой территории или в гараже, а также в дневное время, когда электромобиль находится на парковке, оборудованной электрозарядным устройством.

Емкость батарей современных электромобилей составляет 25-40 кВт\*час, пробег при полном заряде составляет 120-180 км. Будем считать, что каждый электромобиль заряжается ежедневно, несмотря на то, что его суточный пробег может быть меньше максимально возможного. На самом деле, опасения, связанные с ограниченным пробегом и невозможностью гарантированно и быстро подзарядиться, являются одним из основных факторов, сдерживающих стремительное внедрение электромобилей на мировом рынке [1].

В различных источниках, посвященных планированию зарядной инфраструктуры для электромобилей, упоминается понятие «радиус обслуживания» зарядной станции [2]. По сути, под этим подразумевается просто величина пробега транспортного средства в километрах или расстояние, которое может проехать электромобиль после одной зарядки в течение заданного времени. Отметим, что таким образом радиус обслуживания получается больше реального. Допустим, в точках А и В (рис. 3.1)

расположенных на расстоянии 100 км, находятся зарядные станции.

Электромобиль, имея изначально полный заряд, вполне может добраться из пункта А в пункт В. Однако, зачастую, владелец транспортного средства хочет добраться до некоего пункта С и вернуться обратно. В таком случае, фактический километраж получается большим.



Рис. 3.1. Иллюстрация понятия «Радиус обслуживания» зарядной станции

Кроме того, расстояние между исходным и конечным пунктом нельзя считать чисто геометрически, поскольку фактическая траектория движения автомобиля не является прямолинейной.

Таким образом, ставится задача: разместить минимально необходимое количество зарядных станций для электромобилей таким образом, чтобы удовлетворить спрос, обеспечить фактический радиус обслуживания при условии минимальных затрат на их установку.

### **3.2. Метод иерархической кластеризации для определения точек спроса**

Существует множество математических подходов касательно оптимального размещения каких-либо объектов [3-5]. Наиболее удачным является метод иерархической кластеризации [6]. Авторы предлагают подход, в котором город разбивается на кластеры, а «точки спроса» - требуемое место установки зарядной станции, определяется исходя из объема трафика автомобилей. Для этого предлагается использовать данные с камер наблюдения за дорожным движением или какие-нибудь датчики/счетчики, установленные, например, под дорожным полотном.

Поскольку мы рассматриваем проблему размещения станций медленной, а не быстрой зарядки, более правильным будет исходить из количества жителей в



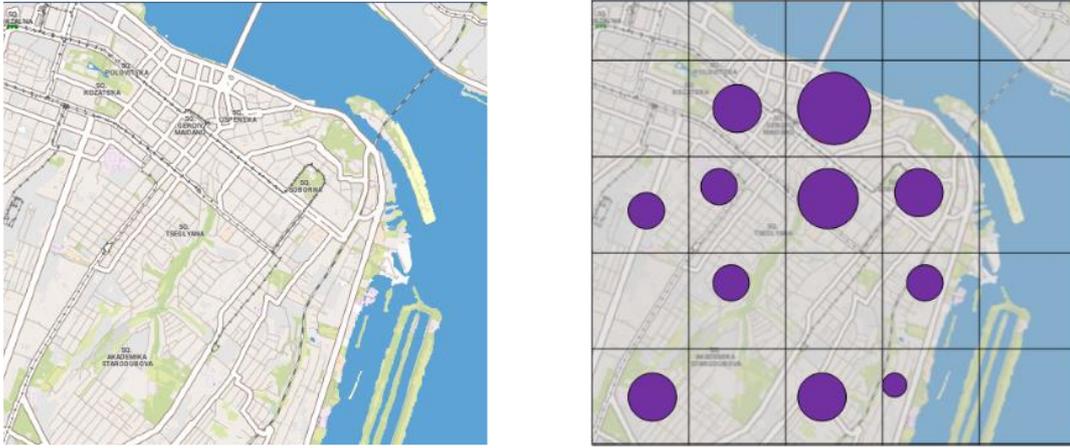


Рис. 3.3. Присваивание веса кластеру

На рис. 3.4 показана карта города Днепр с точками спроса, размер которых примерно соответствует населенности того или иного района.

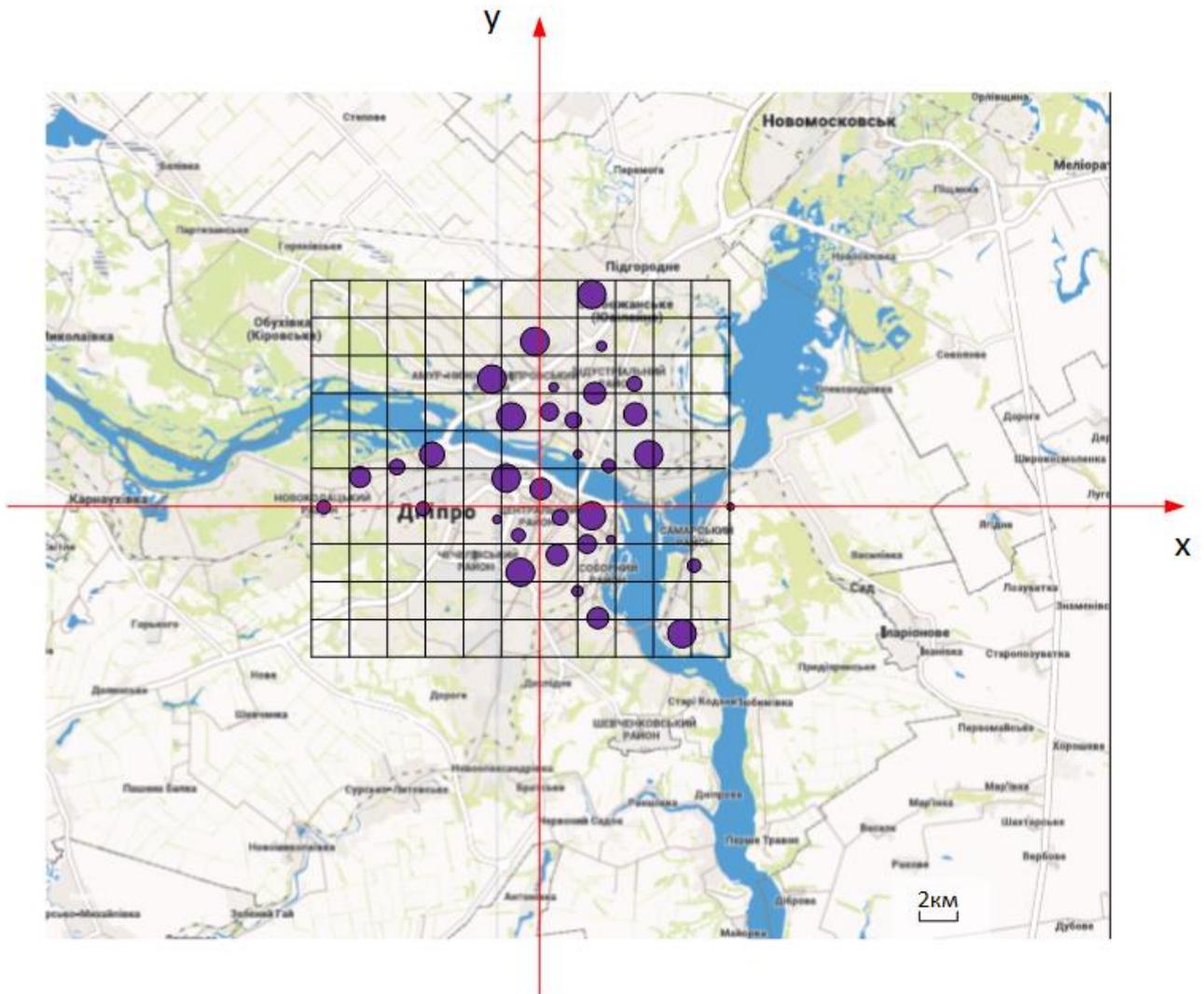


Рис. 3.4. Карта города Днепр с предполагаемыми точками спроса  
 Координаты точек спроса и численность населения по районам (данные 2017 г. [7]) даны в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Координаты кластеров и численность населения.

№ точки	Координата, км		Население, тыс. чел.	Район
	х	у		
1.	-11,4	0	163	Новокодацкий
2.	-9,2	1,6		
3.	-6	0		
4.	-7,6	2,2		
5.	-5,8	3		
6.	-1,8	1,8	58	Центральный
7.	0	1		
8.	-2,2	-0,4		
9.	-1	-1,6		
10.	1,2	-0,4	141	Шевченковский
11.	1,2	-2,6		
12.	2,8	-0,2		
13.	2,6	-2	158	Соборный
14.	3,8	-1,8		
15.	2	-4,2		
16.	3,2	-6		
17.	-0,8	-3,6	113	Чечеловский
18.	-1,6	4,4	144	Амур-Нижнеднепровский
19.	-2,4	6,4		
20.	-0,6	8,4		
21.	1,6	4,8		
22.	2	2,8		
23.	3,8	2,2	126	Индустриальный
24.	5,6	2,6		
25.	5	5		
26.	5	6,4		
27.	2,6	11,2		
28.	10	0	73	Самарский
29.	8,2	-2,8		
30.	7,6	-6,6		
ВСЕГО			<b>976</b>	

Изначально, в качестве точки спроса может служить каждое жилое/административное здание, торговый комплекс или парковка. Таких точек намного больше, чем количество зарядных станций в распоряжении. Поэтому эти точки следует объединять в кластеры по критерию количества жителей. Объединенные точки образуют кластер второго уровня, несколько

объединенных кластеров второго уровня образуют кластер третьего уровня и так далее. Графически это представляется с помощью так называемого «иерархического дерева», показанного на рис. 3.5.

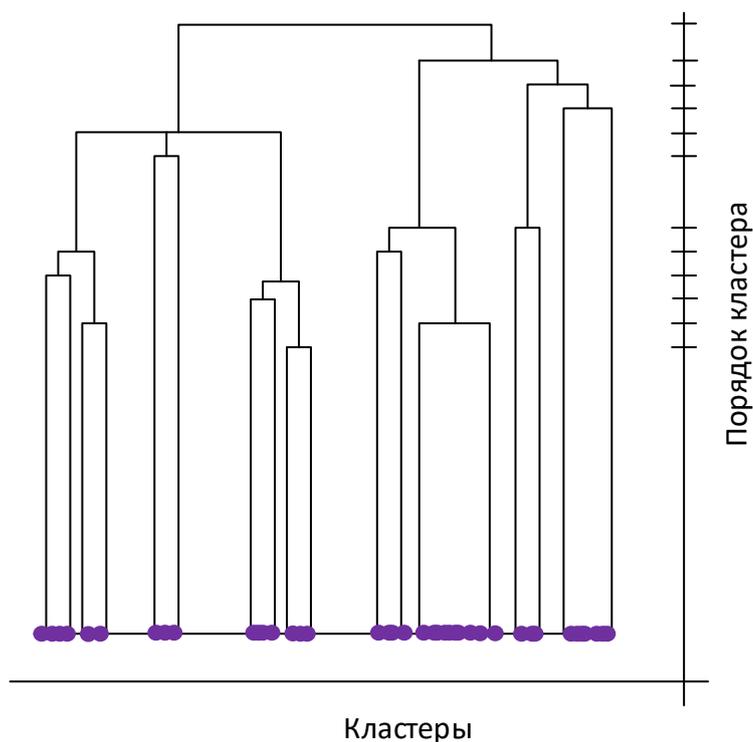


Рис. 3.5. Иерархическое дерево кластеров

Центр каждого нового кластера высшего уровня располагается в «центре масс» точек или кластеров, которые он объединяет. То есть центр кластера смещен в сторону точек с большей плотностью населения.

Таким образом, по мере повышения уровня иерархии, на карте остается все меньше и меньше кластеров. Это позволит лицам, принимающим решения, выбрать наиболее подходящий уровень иерархии с учетом количества ресурсов в их распоряжении.

На рис. 3.6 показана карта города Днепр с точками спроса и кластерами второго и третьего уровней.

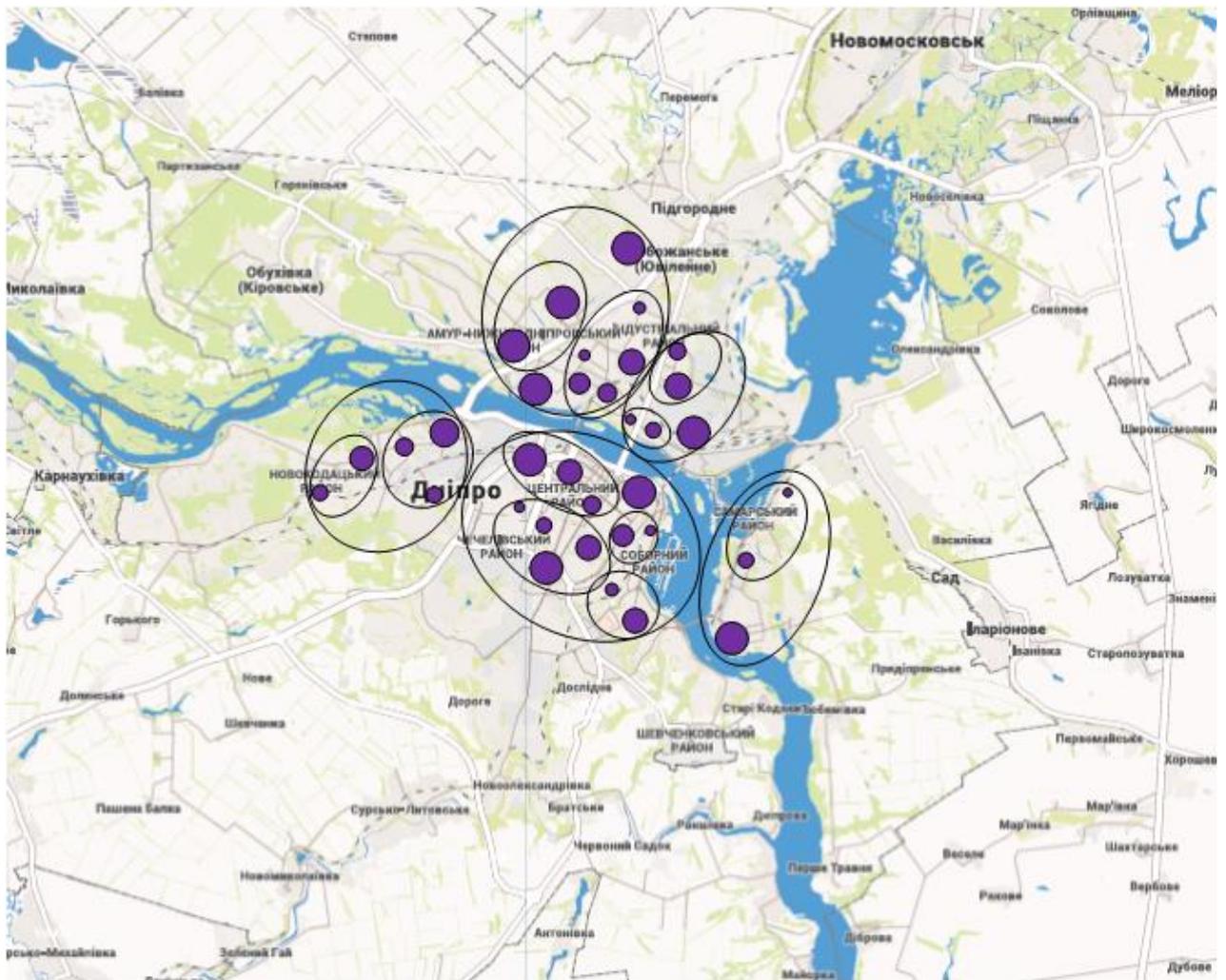


Рис. 3.6. Карта города Днепр с кластерами второго и третьего уровней.

### 3.3. Алгоритм оптимизации размещения зарядных станций

Возможными местами установки зарядных станций являются парковки, гаражные кооперативы, территории, прилегающие к торгово-развлекательным комплексам, паркинги, существующие заправочные станции для обычных автомобилей и т.п. Назовем такие места «кандидатами» для размещения зарядных станций.

На рис. 3.7 показаны точки-кандидаты для установки зарядных станций на территории г. Днепр.

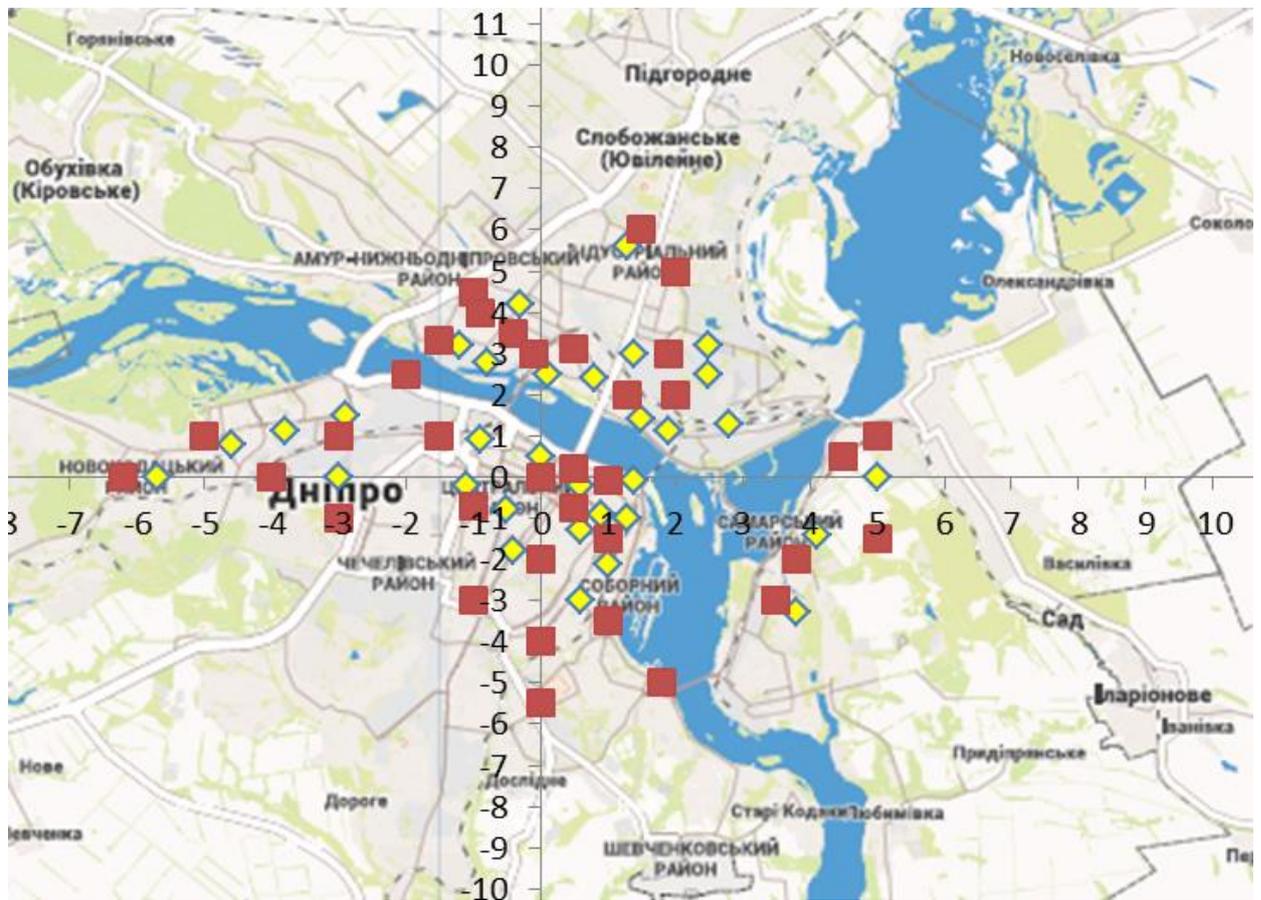


Рис. 3.7. Расположение точек-кандидатов для размещения зарядных станций электромобилей

Исходной информацией для разработки алгоритма определения местоположения зарядных станций является допущение о том, что количество зарядных станций всегда меньше количества возможных точек-кандидатов. Среди кандидатов будем искать ту точку, в которой обеспечивается максимум критерия оптимизации.

В качестве главного критерия выбора места расположения зарядной станции примем сумму расстояний до центров кластеров с учетом веса каждого из них. Т.е. одно и то же расстояние будет расцениваться по-разному для районов с различной численностью.

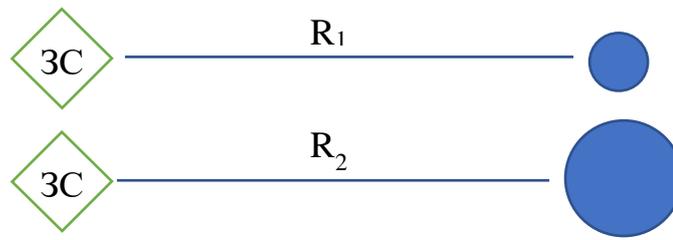


Рис. 3.8. Пояснение критерия оптимизации

Критерий оптимизации будем рассчитывать так:

$$Q = \sum_i (R_i \cdot P_i) \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

где  $i$  – номер кластера;

$P_i$  – численность населения в  $i$ -м кластере.

В нашем примере 32 кластера, примем, что доступное количество зарядных станций – **8 шт.**

Сформулируем алгоритм размещения зарядных станций следующим образом.

1. Задаемся уровнем иерархии, он определяет количество и параметры кластеров в рассмотрении
2. Определяем координаты центров кластеров и кандидатов на установку зарядных станций для электромобилей
3. За каждой точкой-кандидатом закрепляем кластеры исходя из радиуса обслуживания зарядной станции. Закрепленные кластеры вычеркиваются из списка на текущей итерации (чтобы не попасть в расчет для другого кандидата).
4. Когда все кластеры закреплены за кандидатами, рассчитывается критерий оптимизации.
5. Результат расчета (набор точек-кандидатов и получившийся критерий оптимизации) сохраняется и точки-кандидаты, принявшие участие на итерации, вычеркиваются из списка.
6. Пункты 1-5 повторяют до тех пор, пока не будут перебраны все кандидаты.

Алгоритм оптимизации показан на рис. 3.9.

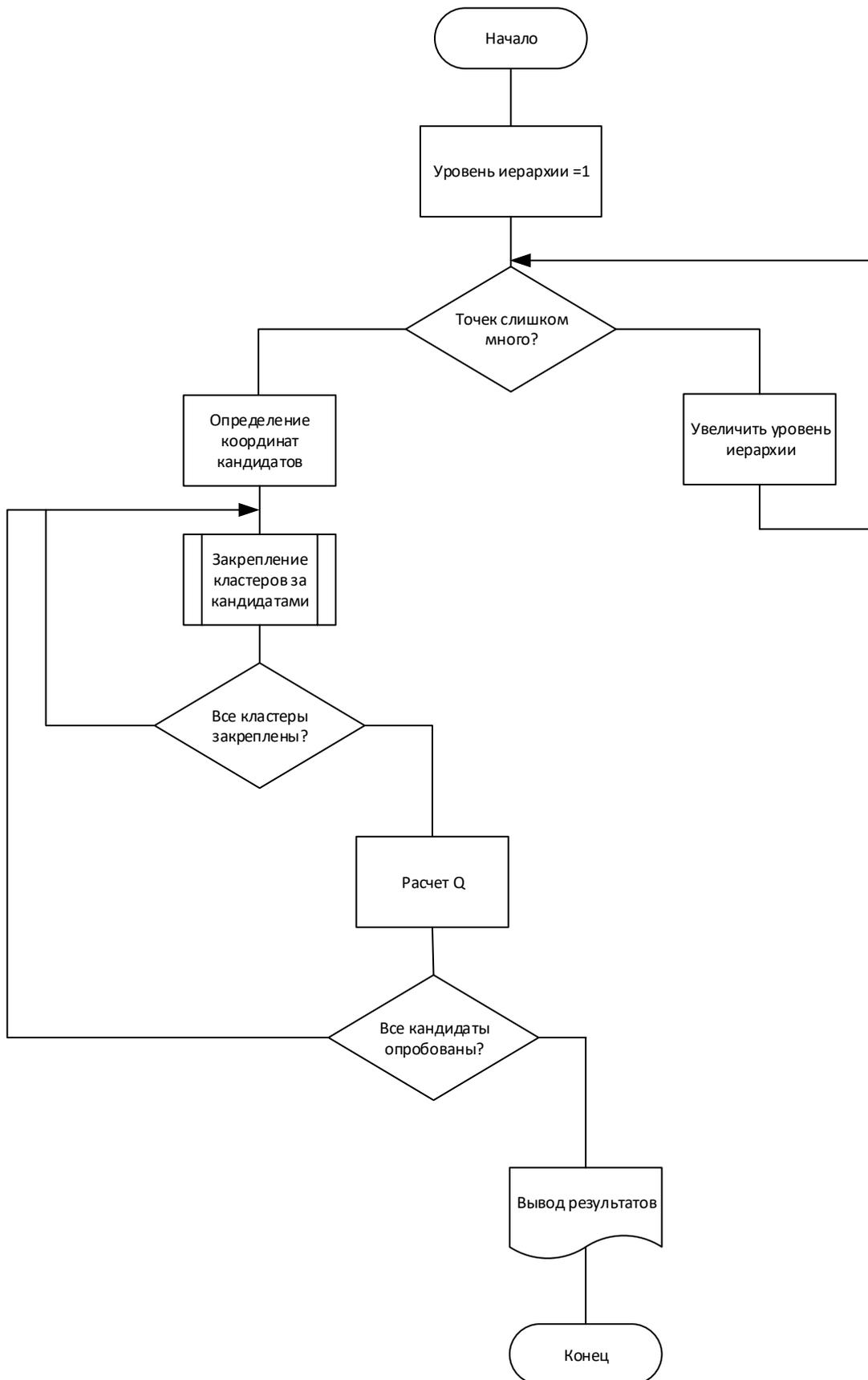


Рис. 3.9. Блок-схема алгоритма оптимизации

На рис. 3.10 показан результат оптимизации – выбранные точки для установки зарядных станций и связанные с ними («обслуживаемые») кластеры.



Рис. 3.10. Результат оптимального расположения зарядных станций

Отметим, что в качестве «весового» фактора могут применяться и другие показатели, например, социальная значимость или некое удобство с точки зрения дорожно-транспортной сети, выраженное в баллах.

Таким образом, представленный алгоритм является масштабируемым и гибким. Исходя из имеющихся ресурсов, люди, принимающие решения могут выбрать уровень иерархии кластеров, а в критерий оптимизации закладывать различные целевые параметры.

## ВЫВОДЫ

В дипломном проекте решена задача рационального расположения и оптимизации параметров зарядных станций для электромобилей.

Предложен подход, который основывается на методе иерархической кластеризации. Суть его заключается в том, что с учетом множества факторов и ограничений выбираются «кандидаты» на места расположения зарядных станций, а из них отбираются те, которые обеспечивают максимум критерия оптимизации, т.е. минимум расстояния до кластеров с учетом населения каждого. В качестве «веса» фактора могут применяться и другие показатели, например, социальная значимость или удобство с точки зрения дорожно-транспортной сети.

Представленный в работе алгоритм является масштабируемым и гибким. Исходя из имеющихся ресурсов, люди, которые принимают решения могут выбирать уровень иерархии кластеров, а в критерий оптимизации закладывать разные целевые параметры.

## Список литературы

- 1 D.Herron. Range Confidence: Charge Fast, Drive Far, on Electricity. Web-resource: <https://greentransportation.info/ev-charging/range-confidence/chap1/1-introduction.html>
- 2 Du A, Hu Z, Song Y, Wu JY. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations. Power system technology. 2011;2(11):35-42.
- 3 K. Morrow, D. Karner and J. Francfort, “Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review”, US Department of Energy-Vehicle Technologies Program, (2008).
- 4 H. Gao, Y. Huo and Y. Luo, “Optimization Model of the Public EV Charging Station Distribution in City”, International Conference on Transportation Engineering, ASCE, (2009), pp. 3166-3171.
- 5 T. Sweda and D. Klabjan, “An agent-based decision support system for electric vehicle charging infrastructure deployment”, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), IEEE, (2011), pp. 1-5.
- 6 A. Ip, S. Fong, E.Liu. Optimization for allocating BEV recharging stations in urban areas by using hierarchical clustering
- 7 Electric and hybrid vehicles design fundamentals; CRC Press, Taylor & Francis e-Library, 2005
- 8 Advanced lithium-ion batteries for plug-in hybrid-electric vehicles; Paul Nelson, Argonne National Laboratory, 9700 S.Cass Ave, Argonne, IL 60439 630-252-4503.
- 9 Field Testing Plug-in Hybrid Electric Vehicles with Charge Control Technology in the Xcel Energy Territory, Technical Report NREL/TP-550-46345 August 2009