

УДК 621.354.3:621.314.58

EDN NJSZTW

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ V2G
ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ЭНЕРГОДЕФИЦИТА
В ПРОВИНЦИИ МАЙСАН (ИРАК): МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ**

Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил

ORCID: 0000-0003-0583-0559 e-mail: alijber1987@uomisan.edu.iq

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
Москва, Россия
Университет Майсан
Майсан, Ирак

Представлены результаты исследования потенциала технологий двунаправленного преобразования электроэнергии (*V2G*) для компенсации энергодефицита в условиях провинции Майсан (Ирак). На основе данных Министерства электричества и провинциального управления электроснабжения за 2018-2023 гг. выполнен анализ энергетического баланса региона, выявлены системные причины дефицита мощности, проведено моделирование сценариев внедрения *V2G*-систем в среде *Matlab*. Рассчитан потенциал отдачи энергии от аккумуляторов электромобилей с учетом коэффициента участия, глубины разряда и КПД преобразователей. Показано, что при проникновении электромобилей на уровне 1 % от автопарка (≈ 5000 ед.) технология *V2G* способна обеспечить до 112,5 МВт·ч в сутки и снизить пиковую нагрузку на 35 МВт (≈ 39 % дефицита). Определено, что наибольший эффект достигается в межсезонье и зимний период, когда дефицит мощности ниже. Разработана методика расчета минимально необходимого числа зарядных станций (≈ 1500 -1800 ед.), и предложена карта их приоритетного размещения вблизи критически важных объектов – больниц, ирригационных насосных станций и транспортных парков. Полученные результаты подтверждают техническую реализуемость и социально-экономическую целесообразность локализованной модели *V2G* для энергодефицитных регионов Ирака.

Ключевые слова: двунаправленное преобразование; *V2G*; инфраструктура зарядных станций; Майсан; моделирование; *Matlab*; энергодбаланс; энергодефицит; электромобили.

Для цитирования: Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил. Применение технологий *V2G* для компенсации энергодефицита в провинции Майсан (Ирак): моделирование и инфраструктурные решения // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 1. С. 48-66. EDN NJSZTW

**APPLICATION OF V2G TECHNOLOGIES
TO COMPENSATE FOR ENERGY DEFICIT
IN MAYSAN PROVINCE (IRAQ):
MODELING AND INFRASTRUCTURE SOLUTIONS**

Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil

ORCID: 0000-0003-0583-0559 e-mail: alijber1987@uomisan.edu.iq

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

Moscow, Russia

University of Maysan

Maysan, Iraq

Abstract. This paper presents results of assessing the potential of vehicle-to-grid (V2G) technologies to compensate energy deficits in Maysan province (Iraq). Based on Ministry of Electricity and Provincial Electricity Directorate data for 2018–2023, the region’s energy balance was analyzed and causes of capacity shortages were identified. Matlab simulations of V2G deployment scenarios were conducted. The energy contribution from EV batteries was estimated considering participation rate, depth of discharge and converter efficiency. It is shown that at 1% EV penetration (≈ 5000 vehicles), V2G can provide up to 112.5 MWh/day and reduce peak load by 35 MW ($\approx 39\%$ of deficit). The greatest effect is expected in interseasonal and winter periods. A methodology to compute required number of bidirectional chargers (~ 1500 – 1800) and a priority map of station placement near hospitals, irrigation pump stations and fleet depots are proposed. Results support the technical feasibility and socio-economic justification of a localized V2G model for energy-deficit regions.

Keywords: vehicle-to-grid; V2G; charging infrastructure; Maysan; modelling; Matlab; energy balance; energy deficit; electric vehicles.

For citation: Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil, “Application of V2G technologies to compensate for energy deficit in Maysan province (Iraq): modeling and infrastructure solutions”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 48-66, 2026. EDN NJSZTW

I. Введение

Развитие современных электроэнергетических систем в развивающихся странах сопровождается ростом дисбаланса между спросом и предложением электроэнергии, что приводит к устойчивому энергодефициту и снижению надежности системы. В Ираке, несмотря на значительные запасы углеводородного топлива, дефицит носит системный характер [1–3]. По данным *International Energy Agency*, установленная мощность страны составляет около 25–26 ГВт, тогда как фактическая генерация не превышает 22–

24 ГВт [1, 2]. Доля возобновляемых источников, несмотря на высокий солнечный потенциал (> 2000 кВт·ч/м²/год), остается менее 1 %, что указывает на имеющийся потенциал для децентрализованной генерации [3, 4, 5]. Наиболее острый дефицит наблюдается в южных провинциях, включая Майсан. Летом национальный спрос достигает 35 ГВт, а фактическая генерация – 24 ГВт, формируя структурный дефицит около 11-12 ГВт [6, 7]. В Майсане среднесуточный дефицит мощности в пиковые часы составляет 90-130 МВт, а продолжительность отключений достигает 6-8 часов [6, 8]. Нагрузка характеризуется выраженными дневными и вечерними пиками (рис. 1), типичными для жаркого климата с высокой долей бытового потребления.

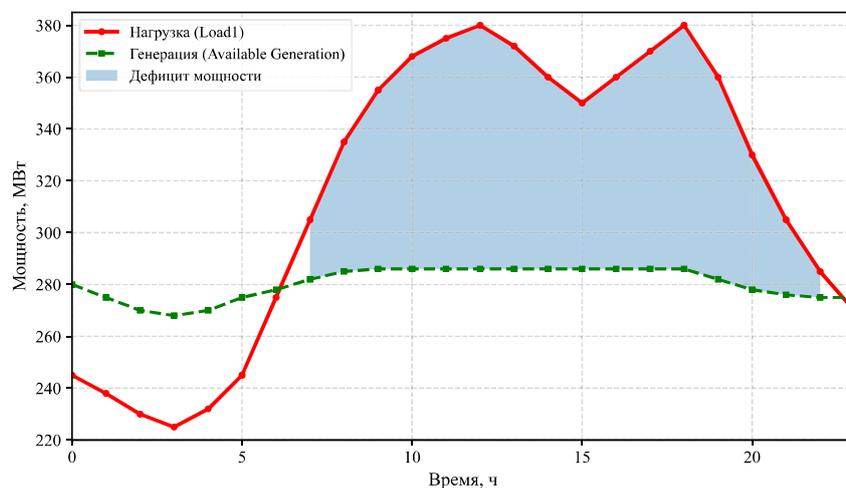


Рис. 1. Типичный суточный профиль нагрузки и генерации (июль 2023 г.)

Fig. 1. Typical daily load and generation profile (July 2023)

В таких условиях децентрализованные и интеллектуальные технологии управления нагрузкой становятся приоритетными. Технология *Vehicle-to-Grid (V2G)* позволяет использовать аккумуляторные батареи электромобилей не только в качестве потребителей, но и как распределенные накопители, способные отдавать энергию в сеть в часы пикового спроса и заряжаться при избыточной генерации в ночные часы [9-14]. Даже при низком проникновении электромобилей (1-2 % автопарка) возможно возвращение десятков МВт·ч энергии, что поддерживает сглаживание пиков, интеграцию в виртуальные электростанции (*VPP*) и развитие *Smart Grid* [12, 15].

Однако внедрение *V2G* в Ираке сдерживается техническими, экономическими и институциональными барьерами: деградация аккумуляторов

при циклах зарядки-разрядки, колебания напряжения (180-240 В), отсутствие *EMS*, высокая стоимость двунаправленных зарядных станций и отсутствие нормативной базы, включая стандарты *ISO 15118* и *IEC 61851* [1, 7, 11]. Международный опыт (Дания, Япония, США) показывает, что успешное внедрение *V2G* возможно при государственной поддержке, инвестиционных стимулах и стратегических программах электрификации транспорта [12]. Для Майсана, с высокой инсоляцией, растущим спросом и ограниченной пропускной способностью сети, *V2G* может частично компенсировать дефицит, повысить надежность и способствовать формированию локальных микросетей [3-4, 13].

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью оценки потенциала *V2G* для компенсации суточного и пикового дефицита, а также разработки методики планирования инфраструктуры зарядных станций для двунаправленного взаимодействия электромобилей с сетью.

В условиях растущего дисбаланса между выработкой и потреблением электроэнергии в Ираке особую значимость приобретают исследования, направленные на внедрение интеллектуальных, децентрализованных и гибких решений для управления нагрузкой в электрических сетях. В последние годы активное развитие получила и отечественная научная база, посвященная вопросам интеграции электромобилей, двунаправленной зарядной инфраструктуры и моделирования режимов ее функционирования. В частности, в [16] выполнен комплексный сравнительный анализ односторонних (*G2V*) и двусторонних (*V2G*) зарядных станций, в котором охарактеризованы различия в архитектуре, функциональных возможностях, а также обозначены барьеры их внедрения в условиях развивающихся энергосистем. Авторы показали, что двунаправленные станции способны выполнять роль распределенных узлов хранения энергии, обеспечивая повышение устойчивости энергосистемы при корректно разработанной архитектуре управления.

В продолжение данного направления исследования выполнено математическое моделирование процессов зарядки аккумулятора электромобиля от сети и отдачи мощности обратно в сеть с использованием программной среды *Matlab* [17]. Полученные результаты подтвердили применимость моделей *G2V/V2G* для анализа энергетического баланса и расчета эффективности *V2G*-циклов при различных сценариях загрузки сети. В [18] рассмотрены современные подходы к динамическому управлению процессами зарядки, что напрямую соотносится с задачей минимизации пиковых нагрузок и предотвращения перегрузок в трансформаторных и распределительных узлах.

Сопоставление указанных научных результатов с международными исследованиями [9-13] показывает, что технология *V2G* может быть эффективно внедрена в энергетических системах (рис. 2), испытывающих дефицит мощности, при условии наличия корректной математической модели, инфраструктурной адаптации и установленных регламентов двунаправленного энергообмена.

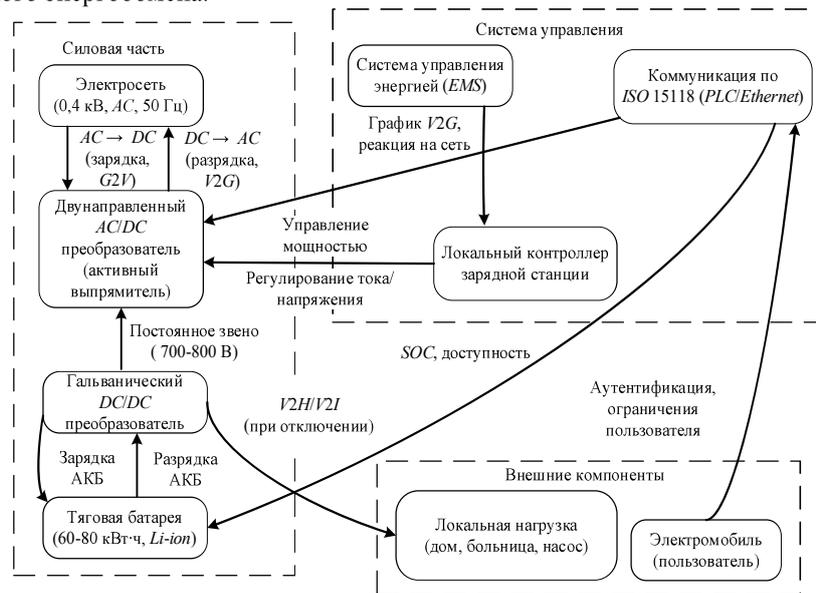


Рис. 2. Принципиальная схема двунаправленного энергообмена в *V2G* системе (силовая и управляющая части)

Fig. 2. Schematic diagram of bidirectional energy exchange in a *V2G* system (power and control parts)

Для наглядного представления перераспределения потоков мощности между объектами энергосистемы провинции Майсан предлагается включить структурную схему *V2G*, отражающую взаимодействие электросети, парка электромобилей, зарядной инфраструктуры и локальных потребителей. На рис. 3 представлена структурная схема предлагаемой *V2G*-системы, демонстрирующая перераспределение потоков мощности между централизованной генерацией, распределительной сетью, двунаправленными зарядными станциями и аккумуляторными батареями электромобилей. В пиковые часы электромобили работают в режиме *V2G*, отдавая часть накопленной энергии в сеть или локальным потребителям (больницы,

насосные станции), а в ночные и межпиковые периоды осуществляется зарядка аккумуляторов (режим $G2V$).

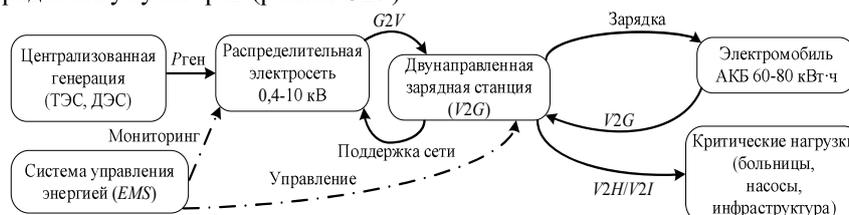


Рис 3. Структурная схема предлагаемой V2G-системы и перераспределение потоков мощности

Fig 3. Block diagram of the proposed V2G system and redistribution of power flows

II. Исходные данные

Энергетический баланс провинции Майсан (2018-2023 гг.)

Провинция Майсан, расположенная на юге Ирака, характеризуется жарким климатом с экстремальными летними температурами, что вызывает значительные колебания суточного спроса на электроэнергию (рис. 1) [6-8]. Согласно данным Министерства электричества Ирака за 2018-2023 гг. [6, 7], средняя установленная мощность электростанций региона составляет около 420 МВт, тогда как фактически доступная мощность варьируется в диапазоне 280-300 МВт, что соответствует коэффициенту обеспеченности примерно 0,71 [5, 8]. В 2023 г. среднесуточное потребление электроэнергии достигало 3,8 ГВт·ч, при этом максимальная нагрузка в летние месяцы (июль-август) составила 370-380 МВт, создавая пиковый дефицит мощности около 90-100 МВт [6, 8, 13]. Суточный профиль нагрузки характеризуется двумя ярко выраженными пиками – утренним (08:00-11:00) и вечерним (18:00-22:00), что типично для регионов с жарким климатом и высокой долей бытового потребления [3-4, 7].

Максимальные отклонения наблюдаются летом, когда дефицит мощности превышает 20 % пикового спроса. В вечерние часы (18:00-22:00) нагрузка достигает 90-95 % пиковой, что вызывает отключения продолжительностью 4-8 ч/сут. (табл. 1).

Прогноз дефицита электроэнергии до 2030 г. построен методом регрессии с учетом демографического роста (2,3 %/год), урбанизации и увеличения потребления бытовой техники.

Расчеты показывают рост среднесуточного потребления до 5,9 ГВт·ч/сут и пиковых нагрузок до 520 МВт. При отсутствии модернизации генерации дефицит может достигнуть 140-170 МВт.

Таблица 1.

Суточный энергобаланс в городе Майсан (2023 г.)

Table 1.
Daily energy balance in the city of Maysan (2023)

Месяц	Потребление, ГВт ч/сутки	Генерация, ГВт ч/сутки	Дефицит, ГВт ч/сутки	Пиковая нагрузка, МВт	Доступная мощность, МВт	Дефицит мощности, МВт
Январь	3,2	2,8	0,4	290	280	10
Апрель	3,6	2,9	0,7	320	285	35
Июль	4,8	3,0	1,8	380	290	90
Октябрь	3,9	3,1	0,8	330	295	35
Декабрь	3,4	2,7	0,7	300	280	20

Источники: Министерство электричества Ирака (2023), Provincial Electricity Directorate – Maysan.

Математическая модель баланса мощности и энергии

Оценка потенциала систем двунаправленного преобразования энергии ($V2G$) выполнена на основе математической модели баланса мощности и энергии между аккумуляторными батареями электромобилей (EV) и сетью электроснабжения провинции Майсан. Модель реализована в среде *Matlab/Simulink* (версия *R2023a*) с часовым шагом дискретизации (для суточных расчетов) и шагом 1 мин для анализа динамики пиковых режимов.

Основные допущения модели:

– средняя емкость аккумуляторной батареи электромобиля: $C_{\text{АКБ}} = 70$ кВт/ч (типичные модели: *Nissan Leaf*, *Hyundai Kona*, *Tesla Model 3*);

– глубина разряда (*Depth of Discharge, DoD*): 50-70 %, так как производители не рекомендуют снижать уровень заряда ниже 20-30;

– коэффициент участия электромобилей в $V2G$: $K_{\text{уч}} = 0,6$ (60 % владельцев подключают автомобиль к сети регулярно);

– КПД двунаправленного преобразования энергии (AC/DC , DC/DC): $\eta_{\text{преобр}} = 0,89$;

– среднее время подключения EV к сети: 10 часов/сутки (в основном в вечернее и ночное время, 18:00-06:00);

– продолжительность пикового периода: $t_{\text{пик}} = 4$ ч (18:00-22:00);

– мощность разряда при $V2G$: $P_{\text{разр}} = 7$ кВт ($AC V2G$).

Расчетная схема модели

Энергетический обмен описывается системой уравнений (1)-(5), где учитываются емкость аккумулятора, глубина разряда, потери преобразования и доля участвующих электромобилей.

$$E_{\text{дост}} = C_{\text{АКБ}} \cdot DoD ; \quad (1)$$

$$E_{\text{отданная}} = E_{\text{дост}} \cdot \eta_{\text{преобр}} ; \quad (2)$$

$$E_{\text{реал}} = E_{\text{отданная}} \cdot K_{\text{уч}}; \quad (3)$$

$$E_{\text{пик}} = P_{\text{разр}} \cdot t_{\text{пик}}; \quad (4)$$

$$E_{\text{пик, реал}} = \min(E_{\text{пик}}, E_{\text{реал}}), \quad (5)$$

где $E_{\text{дост}}$ – доступная энергия из аккумулятора EV , (кВт/ч); $E_{\text{отданная}}$ – энергия с учетом КПД преобразования; $E_{\text{реал}}$ – реальный объем, возвращаемый в сеть; $E_{\text{пик}}$ – возможная отдача за пиковый период; $E_{\text{пик, реал}}$ – реально доступная энергия в пиковое время.

Методика расчета количества зарядных станций

Для определения количества двунаправленных зарядных станций ($V2G$ устройств), необходимых для покрытия заданного объема энергопередачи $E_{\text{цел}}$, используется выражение:

$$N_{\text{станций}} = \frac{E_{\text{цел}}}{P_{\text{разр}} \cdot t_{\text{пик}} \cdot K_{\text{исп}}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{исп}}$ – коэффициент использования станции (0,8-0,9).

Данное уравнение позволяет определить минимально необходимое количество $V2G$ -устройств для компенсации части пикового дефицита в энергосистеме.

Блок-схема моделирования

В среде *Simulink* модель представлена следующими функциональными блоками:

- блок *Load Profile* – загрузка фактических данных суточного энергопотребления (2018-2023);
- блок *EV Fleet* - параметры парка электромобилей (N , $C_{\text{АКБ}}$, DoD);
- блок *Bidirectional Converter* – расчет потерь при преобразовании ($\eta = 0,89$);
- блок *Grid Balancer* – суммирование энергопотоков и сравнение с профилем дефицита;
- блок *Output Analyzer* – расчет показателей снижения пиковых нагрузок.

Результаты моделирования экспортируются в виде временных рядов мощности и энергии, что позволяет построить графики суточных профилей до и после интеграции $V2G$ (рис. 4).

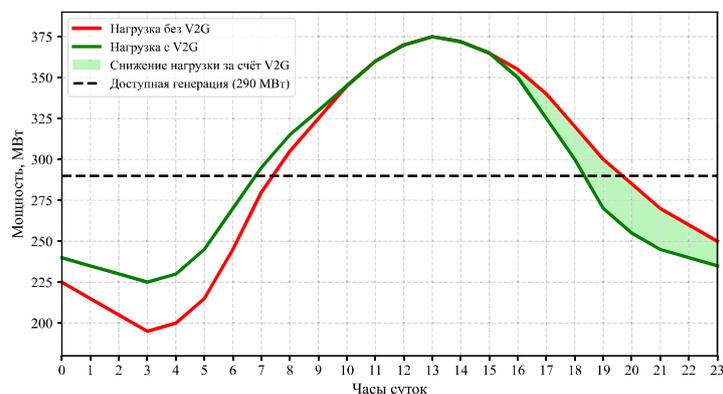


Рис. 4. Распределение мощности в сети с учетом V2G (пик и межпик) и сравнение профилей нагрузки до и после интеграции V2G-системы

Fig. 4. Network power distribution taking into account V2G (peak and inter-peak) and comparison of load profiles before and after integration of the V2G system

Используемые параметры Matlab-моделирования

Для количественной оценки потенциала двунаправленного преобразования энергии в условиях провинции Майсан выполнено моделирование суточных и пиковых режимов энергосистемы в среде *Matlab R2023a / Simulink*. Модель включает модули прогнозирования потребления, параметризации парка электромобилей и расчета энергетического обмена по (1)–(6) (табл. 2). Здесь уточнено значение средней емкости аккумуляторной батареи электромобиля, которое принято равным 70 кВт·ч, что соответствует современным серийным моделям *Nissan Leaf*, *Hyundai Kona* и *Tesla Model 3*.

Проверка адекватности модели

Для проверки результатов, полученных при моделировании, использовались следующие критерии:

– баланс энергии:

$$\sum_t (P_{\text{ген}} - P_{\text{потр}} - P_{V2G}) \approx 0, \quad (7)$$

где \sum_t – суммирование по всем моментам времени t (например, по часам суток, дням или месяцам, в зависимости от масштаба модели); $P_{\text{ген}}$ – мощность генерации; электрическая энергия, произведенная всеми источниками в рассматриваемый момент времени; $P_{\text{потр}}$ – потребляемая мощность; электрическая энергия, фактически потребляемая нагрузкой в сети; P_{V2G} – мощность, подключаемая через систему *Vehicle-to-Grid (V2G)*; положительная при отдаче энергии в сеть, отрицательная при зарядке; ≈ 0 – указывает на то, что в сумме по времени

генерация, потребление и $V2G$ примерно сбалансированы; допускается небольшое отклонение ($\pm 3\%$); отклонение не превышает ($\pm 3\%$);

– сходимость временных рядов: профиль нагрузки до и после внедрения $V2G$ демонстрирует уменьшение пиковых значений без нарушения среднесуточного баланса;

– сопоставление с фактическими данными: для периода 2023 г. результаты модели отклоняются от реальных данных *Provincial Electricity Directorate* не более чем на 5 %.

Таблица 2.
Основные исходные данные, использованные в *Matlab* модели

Table 2.
Contains the main source data used in the *Matlab* model

Параметр	Обозначение	Значение	Обоснование
Средняя емкость аккумулятора электромобиля	$C_{\text{АКБ}}$	70 кВт·ч	Соответствует современным серийным моделям электромобилей: <i>Nissan Leaf</i> (62 кВт·ч), <i>Tesla Model 3</i> (75 кВт·ч), <i>Hyundai Kona</i> (64 кВт·ч); усредненное значение
Допустимая глубина разряда	DoD	0,5-0,7	Ограничение по ресурсу и деградации аккумуляторной батареи
КПД преобразования энергии	$\eta_{\text{преобр}}$	0,89	Совокупные потери в <i>AC/DC</i> и <i>DC/DC</i> преобразователях
Коэффициент участия электромобилей	$K_{\text{уч}}$	0,6	Около 60 % владельцев регулярно подключают электромобиль к сети
Мощность разряда в режиме $V2G$	$P_{\text{разр}}$	7 кВт	<i>On-board AC V2G</i> , трехфазная схема подключения
Время пикового периода	$t_{\text{пик}}$	4 ч	Вечерний максимум нагрузки (18:00-22:00)
Среднее время подключения <i>EV</i>	$t_{\text{подкл}}$	10 ч/сут	Преимущественно ночные и вечерние часы
Количество электромобилей в 2024 г.	N_{2024}	300	Оценка Министерства транспорта Ирака
Прогнозируемое количество <i>EV</i> к 2030 г.	N_{2030}	5000	Сценарий проникновения <i>EV</i> на уровне 1 % от автопарка

Источник: авторские расчеты по данным *Provincial Electricity Directorate – Maysan* (2023).

На рис. 5 приведена обобщенная структура имитационной модели *V2G*, реализованной в среде *Matlab/Simulink*. Модель включает блоки профиля нагрузки, парка электромобилей, двунаправленного преобразователя, модуля балансировки сети и блока анализа выходных параметров.

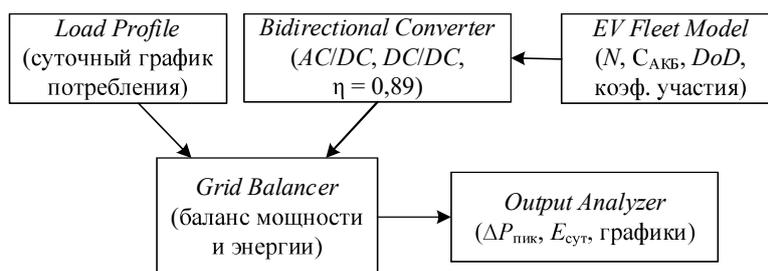


Рис. 5. UML-диаграмма имитационной модели *V2G*, реализованной в *Matlab/Simulink*

Fig. 5. UML diagram of the *V2G* simulation model implemented in *Matlab/Simulink*

Пример полученных выходных данных

Фрагмент типичных результатов моделирования представлен в табл. 3.

Таблица 3.
Фрагмент типичных результатов

Table 3.
Fragment of typical results

Сценарий	Количество <i>EV</i>	Средняя отдаваемая энергия от 1 <i>EV</i> , кВт·ч	Суммарная энергия, МВт·ч/сут	Снижение пиковой нагрузки, МВт
Текущий (2024)	300	22,5	6,8	2,1
Умеренный (2030)	2000	22,5	45,0	14,0
Амбициозный (2030)	5000	22,5	112,5	35,0

Параметры *Matlab*-моделирования позволяют воспроизводить как суточные, так и долгосрочные сценарии развития энергосистемы Майсана с учетом внедрения *V2G*-технологий. Модель обеспечивает количественную оценку влияния электромобильной инфраструктуры на профиль нагрузки и устойчивость энергоснабжения региона.

Рис. 6. наглядно демонстрирует сезонную динамику дефицита и потенциал $V2G$ при двух сценариях: 1000 и 3000 электромобилей. В июле, при пиковом дефиците в 1800 МВт·ч/сутки, $V2G$ с 1000 EV может покрыть лишь 2,7 % дефицита, а с 3000 EV – 8,2 %. В январе, при меньшем дефиците (400 МВт·ч), тот же парк из 3000 EV может покрыть до 37 % дефицита.

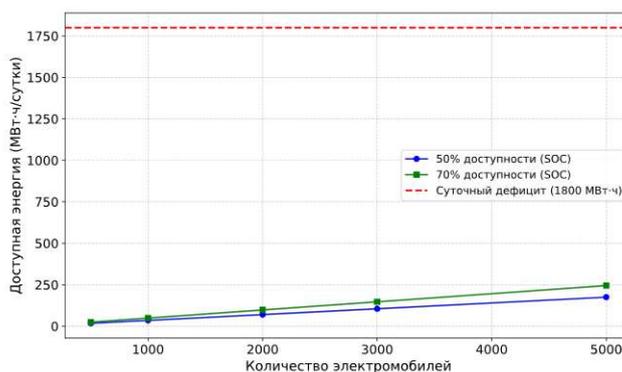


Рис. 6. Доступная энергия от ЭМ при разных сценариях $V2G$

Fig. 6. Available energy from EM under different $V2G$ scenarios

III. Предложения по обеспечению энергобаланса провинции Майсан

Прогноз роста потребления до 2030 года

Для прогнозирования потребления использовалась регрессионная модель с учетом демографического и экономического роста.

Принятые допущения:

- прирост населения – 2,3 %/год;
- рост урбанизации – с 74 % (2023) до 78 % (2030);
- увеличение числа бытовых кондиционеров – 15 %/год;
- рост электрификации сельского хозяйства – 8-10 %/год.

На основе этих факторов и коэффициента эластичности спроса по ВВП ($\epsilon = 1,2$) получены прогнозные значения потребления (табл. 4).

Потенциал $V2G$ при различных сценариях проникновения EV

На основании моделей, реализованных в *Matlab*, оценены следующие три сценария внедрения $V2G$.

1. Базовый (без $V2G$): рост пикового спроса до 520 МВт в 2030 г.
2. Сценарий 0,5 % EV : примерно 2500 электромобилей.
3. Сценарий 1,0 % EV : около 5000 электромобилей (1 % автопарка).

Расчетная доступная энергия от одного электромобиля в режиме $V2G$ $E_{\text{реал}} = 18,7 \dots 26,2$ кВт·ч в сутки, что при среднем значении 22,5 кВт·ч и коэффициенте участия 0,6 соответствует реальной отдаче энергии в пиковые часы 18:00-22:00.

Таблица 4.

Прогноз показателей энергетического баланса провинции Майсан 2023-2030 гг.

Table 4.

Forecast of the energy balance indicators of the province of Maysan for 2023-2030

Год	Население, тыс. чел.	Среднесуточное потребление, ГВт·ч	Пиковая нагрузка, МВт	Дефицит мощности, МВт	Дефицит энергии, ГВт·ч/сут
2023	500	3,8	380	90	1,8
2025	524	4,3	420	110	2,2
2027	550	5,0	480	130	2,6
2030	585	5,9	520	140-170	2,8-3,2

Результаты моделирования сценариев применения технологии V2G в энергосистеме провинции Майсан сведены в табл. 5.

Таблица 5.

Результаты моделирования сценариев применения технологии V2G в энергосистеме провинции Майсан

Table 5.

Results of modeling scenarios for the use of V2G technology in the power system of the province of Maysan

Сценарий	Количество, EV	Суммарная энергия, МВт·ч/сут	Пиковая мощность, МВт	Доля покрытия суточного дефицита	Снижение пиковой нагрузки
Без V2G	–	–	–	0 %	–
V2G (0,5 %)	2500	56	17	≈ 3 %	≈ 9 %
V2G (1,0 %)	5000	112,5	35	6-7 %	≈ 15-18 %

Таким образом, при проникновении EV на уровне 1 % от автопарка, V2G позволяет:

- снизить пиковую нагрузку на 35 МВт (≈ 39 % от дефицита);
- уменьшить продолжительность отключений с 8 до 3-4 часов/сут;
- повысить коэффициент использования генерации с 68 до 79 %;
- существенно снизить дефицит мощности (рис. 7).

Сравнительный анализ показателей энергосистемы провинции Майсан по сценариям внедрения технологии V2G (табл. 6) позволяет заключить, что умеренное внедрение V2G (0,5-1 % EV) обеспечивает эффект, эквивалентный вводу новой генерации мощностью до 60 МВт, при этом не требует значительных капитальных затрат и может быть реализовано с использованием существующих аккумуляторных мощностей электромобилей.

На рис. 7. прогноз снижения пиковой нагрузки при внедрении *V2G* представлен в трёх сценариях: 1) без *V2G*: пиковая нагрузка растёт по экспоненте и достигает 520 МВт к 2030 году; 2) с *V2G* (0,5 % *EV*): рост замедляется, пик снижается до 490 МВт; 3) с *V2G* (1,0 % *EV*): эффект усиливается, пиковая нагрузка составляет 460 МВт – на 60 МВт ниже базового сценария.

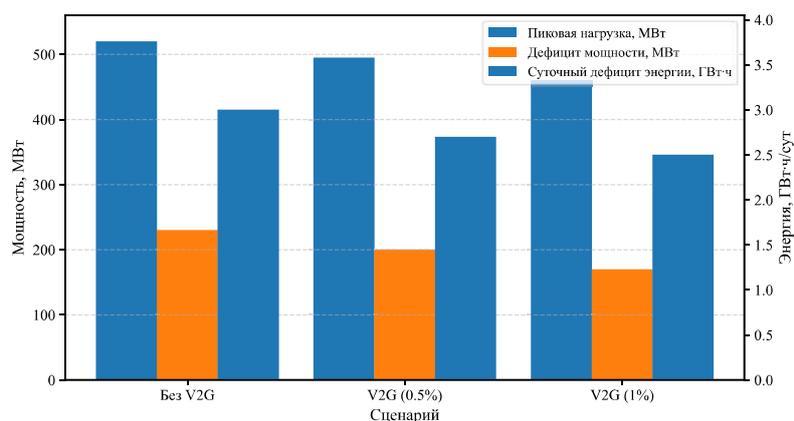


Рис. 7. Прогноз динамики дефицита мощности при разных сценариях *V2G* (2030)

Fig. 7. Forecast of the dynamics of power deficit under different *V2G* scenarios (2030)

Таблица 6.

Сравнительный анализ показателей энергосистемы провинции Майсан по сценариям внедрения технологии *V2G* (прогноз на 2030 год)

Table 6.

Comparative analysis of the indicators of the power system of the province of Maysan according to the scenarios of the introduction of *V2G* technology (forecast for 2030)

Показатель	Без <i>V2G</i>	<i>V2G</i> (0,5 % <i>EV</i>)	<i>V2G</i> (1 % <i>EV</i>)	Изменение относительно базы
Пиковая нагрузка, МВт	520	490	460	-5,8 % / -11,5 %
Дефицит мощности, МВт	230	200	170	-30 / -60 МВт
Суточный дефицит энергии, ГВт·ч	3,0	2,7	2,5	-8 % / -16 %

Выводы по разделу.

1. Энергосистема провинции Майсан находится в состоянии хронического дефицита: летом – до 90 МВт, зимой – 10-20 МВт.
2. Прогноз до 2030 г. указывает на рост потребления на 55 % и увеличение пиковых нагрузок до 520 МВт.

3. При сценарии 1 % *EV* технология *V2G* может вернуть в сеть до 112,5 МВт·ч/сут и снизить пиковую нагрузку на 35 МВт.

4. Эффект наиболее выражен в зимний и межсезонный периоды, когда доля покрытия суточного дефицита достигает до 28 %. Полученные данные подтверждают техническую реализуемость и социально-экономическую целесообразность локализованной модели *V2G* для энергодефицитных регионов.

5. Дополнительно выполнена оценка предполагаемого экономического эффекта от внедрения технологии *V2G*. Снижение пикового дефицита мощности на 35 МВт эквивалентно вводу газотурбинной генерации сопоставимой мощности, капитальные затраты на которую оцениваются в 700-900 USD/кВт. Таким образом, отказ от строительства дополнительной генерации позволяет сэкономить до 25-30 млн USD при использовании существующих аккумуляторных ресурсов электромобилей.

6. Эксплуатационные затраты *V2G*-инфраструктуры также существенно ниже, поскольку отсутствуют расходы на топливо и обслуживание турбинного оборудования. Экономический эффект усиливается за счет снижения потерь в сетях, уменьшения аварийных отключений и повышения надежности электроснабжения социально значимых объектов.

V. Результаты моделирования

Результаты анализа энергетического баланса провинции Майсан за период 2018-2023 гг. показали устойчивое превышение спроса на электроэнергию над возможностями локальной генерации. Анализ суточных графиков показал высокую амплитуду колебаний и низкий коэффициент равномерности, что создает дополнительные потери в сетях и ускоряет износ оборудования.

Прогнозирование потребления до 2030 года, выполненное методом регрессионного анализа с учетом роста населения, урбанизации и промышленного спроса, показало увеличение среднесуточного потребления до 5,9 ГВт·ч и рост пиковых нагрузок до 520 МВт. При сохранении текущей структуры генерации прогнозируется рост дефицита мощности до 150-170 МВт.

В среде *Matlab/Simulink* была разработана математическая модель взаимодействия электромобилей с сетью, основанная на двунаправленном обмене энергией (*V2G*). При параметрах аккумуляторной батареи 70 кВт·ч, глубине разряда 50-70 %, коэффициенте участия 0,6, КПД преобразования 0,89 и мощности разряда 7 кВт один электромобиль способен вернуть в сеть от 18,7 до 26,2 кВт·ч в сутки.

Сценарное моделирование показало, что при проникновении электромобилей на уровне 0,5 % (≈ 2500 *EV*) суммарная отдача энергии достигает 56 МВт·ч/сут, а при 1 % (≈ 5000 *EV*) – 112,5 МВт·ч/сут. Эти значения позволяют компенсировать соответственно 17 и 35 МВт пиковой нагрузки, что снижает амплитуду вечернего пика и уменьшает вероятность перегрузок сети. Сравнение сценариев энергопотребления с и без применения технологии *V2G* показывает

положительный эффект на ключевые показатели энергосистемы. В частности, пиковая нагрузка снижается на 5,8-11,5 %, дефицит мощности уменьшается на 30-60 МВт, а суточный дефицит энергии – на 8-16 %. Введение *V2G* положительно влияет на профиль нагрузки: суточный график становится более сглаженным, повышается коэффициент использования генерации с 0,68 до 0,79, а продолжительность отключений снижается с 8 до 3-4 часов в сутки. Это обеспечивает более равномерную загрузку сетей и снижение потерь.

Сезонный анализ показал, что эффективность *V2G* варьируется в зависимости от времени года. В зимние и переходные периоды доля покрытия суточного дефицита достигает 25-30 %, тогда как в летние месяцы – 6-8 %. Это связано с меньшей глубиной разряда батарей в жаркий сезон и повышенной нагрузкой кондиционирования. Моделирование также подтвердило положительное влияние технологии на устойчивость сети. Отмечено снижение колебаний напряжения, уменьшение частотных отклонений и стабилизация режима работы распределительных подстанций. Таким образом, *V2G* может выполнять функции вспомогательной услуги регулирования мощности и напряжения.

Дополнительно проведена оценка инфраструктурных потребностей для практического внедрения. Оптимальное количество двунаправленных зарядных станций для обеспечения полного использования потенциала *V2G* составляет 1500-1800 единиц, преимущественно в городской зоне Амары и прилегающих промышленных кластерах.

VI. Выводы

Проведенные исследования подтвердили, что внедрение технологии *Vehicle-to-Grid (V2G)* в энергосистему провинции Майсан является технически реализуемым и экономически оправданным решением для снижения энергодефицита. Даже при низком уровне проникновения электромобилей (0,5-1 % автопарка) достигается снижение пикового спроса на 35 МВт, что эквивалентно мощности одной газотурбинной установки среднего класса.

Внедрение *V2G* обеспечивает повышение устойчивости энергосистемы, улучшает качество электроснабжения, снижает потери в сетях и уменьшает продолжительность отключений. Технология способствует интеграции возобновляемых источников энергии, расширяя возможности локальной балансировки и создавая основу для построения «умных» распределенных сетей.

Практическая реализация требует создания сети из 1500-1800 двунаправленных зарядных станций, интегрированных с системой управления энергопотреблением, а также разработки нормативной базы, регулирующей обмен энергией между транспортными средствами и сетью.

Заинтересованность владельцев электромобилей в участии в *V2G*-программах обусловлена прямыми и косвенными экономическими стимулами. К ним относятся компенсация за переданную в сеть электроэнергию, снижение сто-

имости зарядки в ночные часы, приоритетный доступ к зарядной инфраструктуре, а также возможные налоговые и тарифные льготы. Дополнительно владельцы *EV* получают повышенную надежность электроснабжения своих домов в режиме *V2H* при аварийных отключениях, что особенно актуально для энергодефицитных регионов.

Таким образом, технология *V2G* способна стать ключевым элементом модернизации энергетического сектора Ирака, обеспечивая повышение эффективности использования ресурсов и устойчивое развитие региональных энергосистем.

© Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшкил, 2026

Поступила в редакцию 04.12.2025

Принята к публикации 04.12.2025

Received 12.01.2026

Accepted 12.01.2026

Библиографический список

- [1] International Energy Agency. Iraq Energy Outlook: World Energy Investment 2023 Special Report on Iraq. Paris: IEA, 2023. 124 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/reports/iraq-energy-outlook> (дата обращения 01.01.2025)
- [2] World Bank. Renewable Energy Potential in Iraq: A Technical Assessment. Washington, DC: World Bank Group, 2022. 87 p.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA). Solar PV Grid Integration in the Middle East: Opportunities for Decentralized Systems. Abu Dhabi: IRENA, 2022. 76 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Solar-PV-grid-integration-ME> (дата обращения 01.01.2025)
- [4] Ahmed R., Al-Ansari N. Renewable energy integration challenges in the Middle East // Energy Reports. 2022. № 8. P. 1234-1245. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.005
- [5] Khalaf M., Hassan S. Solar energy potential and its utilization in Iraq // Renewable Energy. 2021. № 170. P. 456-467. DOI: 10.1016/j.renene.2021.01.045
- [6] Ministry of Electricity of Iraq. Annual Report on Power Generation and Distribution. Baghdad: MoE, 2023. 98 p.
- [7] Jasim A.K. Load forecasting and deficit analysis in Maysan Province using time series models // Iraqi Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2022. № 18 (2). P. 112-125.
- [8] Al-Chalabi Y., Hussain A. Power sector challenges in southern Iraq: grid reliability and regional disparities // Energy for Sustainable Development. 2021. № 62. P. 45-53. DOI: 10.1016/j.esd.2021.03.005
- [9] Richardson D.B. Electric vehicles and the electricity grid: the challenges and opportunities of integrating distributed energy storage // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. № 19. P. 285-294. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.029
- [10] Kempton W., Tomic J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy // Journal of Power Sources. 2005. № 144 (1). P. 280-294. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.12.022
- [11] Sovacool B.K. Barriers to the adoption of smart grids and electric vehicles in the Middle East // Energy Policy. 2020. № 145. P. 111712. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111712

- [12] Lund H., Østergaard P.A., Connolly D., Mathiesen B.V. Smart energy and smart energy systems // *Energy*. 2017. № 137 P. 556-565. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.123
- [13] Saeed N., Al-Obaidi M. Battery electric vehicles as distributed energy resources: a review of V2G technology and applications in emerging economies // *IEEE Access*. 2023. № 11. P. 45678-45695. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3276543
- [14] Al-Hadithi H., Saeed J. Vehicle-to-grid technology adoption in emerging economies: potentials and barriers // *Journal of Cleaner Production*. 2022. № 338. P. 130616. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130616
- [15] Statista. Electric Vehicle Penetration Forecast in Iraq and Key Provinces (2025-2030). Hamburg: Statista GmbH, 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/iraq-ev-adoption> (дата обращения 01.01.2025)
- [16] Аль-Мохаммедави А.Д.М., Юшкевич У.К. Сравнительный анализ односторонних и двусторонних зарядных станций для электромобилей: особенности функционирования, инфраструктура, проблемы и пути их решения // *Международный технический журнал*. 2024. № 3 (90). С. 15-27. DOI: 10.34286/2949-4176-2024-90-3-15-27
- [17] Сидоров Б.Н., Аль-Мохаммедави А.Д.М. Моделирование в Matlab процесса заряда аккумулятора электромобиля от сети и выдачи мощности в сеть (работа в режиме G2V и V2G) // *Интеллектуальная электротехника*. 2025. № 2. С. 93-111.
- [18] Юшкевич У.К., Сидоров Б.Н., Аль-Мохаммедави А.Д.М. Динамическое управление энергопотреблением электрических зарядных станций: современные подходы и технологии // *Интеллектуальная электротехника*. 2025. № 3. С. 117-128.

References

- [1] *International Energy Agency. Iraq Energy Outlook: World Energy Investment 2023 Special Report on Iraq*, Paris: IEA, 2023. [E-book] Available at: Safari e-book, <https://www.iea.org/reports/iraq-energy-outlook>.
- [2] World Bank. *Renewable Energy Potential in Iraq: A Technical Assessment*. Washington, DC: World Bank Group, 2022. 87 p.
- [3] *International Renewable Energy Agency (IRENA). Solar PV Grid Integration in the Middle East: Opportunities for Decentralized Systems*, Abu Dhabi: IRENA, 2022. [E-book] Available at: Safari e-book, <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Solar-PV-grid-integration-ME>.
- [4] R. Ahmed and N. Al-Ansari, "Renewable energy integration challenges in the Middle East", *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1234-1245, 2022. DOI: 10.1016/j.egy.2022.03.005
- [5] M. Khalaf and S. Hassan, "Solar energy potential and its utilization in Iraq", *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 456-467, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.01.045
- [6] Ministry of Electricity of Iraq. *Annual Report on Power Generation and Distribution*. Baghdad: MoE, 2023. 98 p.
- [7] A.K. Jasim, "Load forecasting and deficit analysis in Maysan Province using time series models", *Iraqi Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 112-125, 2022.
- [8] Y. Al-Chalabi and A. Hussain, "Power sector challenges in southern Iraq: grid reliability and regional disparities", *Energy for Sustainable Development*, vol. 62, pp. 45-53, 2021. DOI: 10.1016/j.esd.2021.03.005

- [9] D.B. Richardson, "Electric vehicles and the electricity grid: the challenges and opportunities of integrating distributed energy storage", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 285-294, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.029
- [10] W. Kempton and J. Tomić, "Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy", *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 280-294, Jun. 2005. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.12.022
- [11] B.K. Sovacool, "Barriers to the adoption of smart grids and electric vehicles in the Middle East", *Energy Policy*, vol. 145, pp. 111712, 2020. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111712
- [12] H. Lund, P.A. Østergaard, D. Connolly and B.V. Mathiesen, "Smart energy and smart energy systems", *Energy*, vol. 137, pp. 556-565, May 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.123
- [13] N. Saeed and M. Al-Obaidi, "Battery electric vehicles as distributed energy resources: a review of V2G technology and applications in emerging economies", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 45678-45695, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3276543
- [14] H. Al-Hadithi and J. Saeed, "Vehicle-to-grid technology adoption in emerging economies: potentials and barriers", *Journal of Cleaner Production*, vol. 338, pp. 130616, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130616
- [15] Statista. *Electric Vehicle Penetration Forecast in Iraq and Key Provinces (2025-2030)*, Hamburg: Statista GmbH, 2024. [E-book] Available at: Safari e-book, <https://www.statista.com/statistics/iraq-ev-adoption>.
- [16] A.J.M. Al-Mohammadawi and U.K. Yushkevich, "Comparative analysis of one-way and two-way charging stations for electric vehicles: infrastructure, challenges and opportunities", *International Technical Journal*, vol. 3, no. 90, pp. 15-27, 2024. DOI: 10.34286/2949-4176-2024-90-3-15-27
- [17] B.N. Sidorov and A.J.M. Al-Mohammedawi, "Matlab simulation of battery charging from the grid and discharging to the grid (G2V and V2G operation)", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 93-111, 2025.
- [18] U.K. Yushkevich, B.N. Sidorov and A.J.M. Al-Mohammedawi, "Dynamic energy management of electric charging station: modern approaches and technologies", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 117-128, 2025.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аль-Мохаммедави Али Джбер Мшkil, Al-Mohammedawi Ali Jber Mshkil, аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, Москва, Российская Федерация; ассистент преподавателя Университета Майсан, Майсан, Ирак. postgraduate student of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation; assistant of the University of Maysan, Maysan, Iraq.