

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования



«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Направление подготовки/профиль 13.06.01 Электро- и теплотехника,
05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы
Школа Инженерная школа энергетики
Отделение Отделение электроэнергетики и электротехники

Научно-квалификационная работа

Тема научно-квалификационной работы
Фотоэлектростанция с комбинированной системой накопления энергии

УДК 621.311.29

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A8-42	Аль-Мажди Каррар Хамид		

Руководитель профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный руководитель ООП	Шутов Евгений Алексеевич	к.т.н., доцент		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Ивашутенко Александр Сергеевич	к.т.н.		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОЭЭ ИШЭ	Лукутин Борис Владимирович	Д.т.н., профессор		

Томск – 2022 г

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важность энергии в современном мире невозможно переоценить, поскольку энергия играет жизненно важную роль в благополучии любого общества и жизни человека. Эффективное использование и снабжение энергией играют существенную роль в экономическом и социальном развитии. Глобальная потребность в электроэнергии, особенно чистой энергии, быстро растет. Эпоха изобилия дешевой энергии не продлится долго. Поэтому возникла необходимость в изучении альтернативной энергетической основы, особенно возобновляемых источников энергии для решения экологических проблем, связанных с энергетикой.

В настоящее время Ирак нуждается в большем количестве электроэнергии из-за роста населения, которое увеличилось с 14 миллионов в 1980 году до 32 миллионов в 2010 году, в 2050 году оно вырастет примерно до 64 миллионов. Удовлетворение энергетических потребностей стало основным источником беспокойства для электроэнергетического сектора Ирака в связи с тем, что отрасли не хватает мощностей для удовлетворения текущего спроса, который удовлетворяется только на 50% от потребностей страны. Нет никаких сомнений в том, что в ближайшие годы пиковый спрос на электроэнергию значительно превысит мощность существующих электростанций. Проблемы с производством электроэнергии в Ираке не новы. Исторически сложилось так, что с 1990 года страна страдала от острой нехватки электроэнергии, которая еще более усугубилась после 2003 года из-за неработоспособности старых электростанций и актов саботажа в последующие годы. Все это привело к длительным отключениям электроэнергии продолжительностью от 14 до 20 часов в сутки, что вынудило обычных людей полагаться на частные генераторы по соседству и / или небольшие бытовые генераторы, оба этих варианта увеличивают финансовое бремя для граждан. Хотя Ирак располагает богатыми запасами ископаемого топлива, нехватка электроэнергии началась после полного разорения страны в 1991 году. Кроме того, месторождения ископаемого топлива несовершенны и, по прогнозам, будут исчерпаны в течение следующих 100 лет. Из-за этого, а также из-за необходимости соответствовать мировым трендам в климатических проблемах следует безотлагательно рассмотреть вопрос о солнечной энергии, которая может помочь смягчить глобальное потепление. Солнечная энергия часто рассматривается как топливо будущего, поскольку она экологически чистая и неисчерпаемая. Солнечная энергия используется двумя основными способами, такими как производство электричества и тепла. Солнечная энергия является возобновляемым, безуглеродным источником энергии и может быть использована для замены

невозобновляемых видов топлива или топлива, выделяющего углерод. В настоящее время Ирак еще не полностью использует солнечную энергию. Хотя, эта энергия может играть значительную роль в производстве энергии в Ираке, так как среднесуточная радиация его территории составляет от 2000 кВтч/м² до 2500 кВтч/м².

Предлагаемая технология строительства гибридных фотоэлектростанций с комбинированным хранением солнечной энергии: в электрохимических аккумуляторах и путём теплового аккумулирования в виде нагретой воды, разработанные математические модели и исследование этих систем путем моделирования и имитации актуальны для Ирака и могут служить основой для развития подобных энергетических комплексов с целью , поддержки центральной энергосистемы, снижения нехватки электроэнергии и уменьшения затрат на энергию.

Ограниченные бюджеты и ущерб, нанесенный войной, означают, что Ирак не производит достаточно электроэнергии для удовлетворения спроса. Растущий спрос увеличивает этот разрыв, поскольку население Ирака растет со скоростью более 1 миллиона человек в год. Там, где позволяют доходы, многие домохозяйства используют местные генераторы, но это дорогостоящая временная мера. В период до 2030 года спрос на электроэнергию удвоится и достигнет примерно 150 тераватт-часов (ТВтч) (17,5 гигаватт [ГВт] в среднем за год). Международное энергетическое агентство провело углубленный анализ для определения краткосрочных и среднесрочных мер, которые могут облегчить наиболее неотложные проблемы в электроэнергетическом секторе. Наиболее серьезные и неотложные дефициты поставок могут быть смягчены путем: быстрого начала технического обслуживания сетей, направленного на небольшое количество высокоэффективных модернизаций; быстрого развертывания новых мобильных энергоблоков; модернизации некоторых существующих электростанций; и обеспечения соблюдения тарифных правил для всех соседних генераторов. В долгосрочной перспективе, без изменения текущей структуры электроснабжения и улучшения сети, к 2030 году потребуется удвоить внутреннюю генерацию, импорт и генерацию соседей, чтобы общий объем поставок составил более 250 ТВтч. Однако существует множество возможностей улучшить этот результат. Существует огромный потенциал для сокращения потерь в сетях, которые являются одними из самых высоких в мире: сокращение этих потерь в два раза поможет значительно повысить эффективность энергоснабжения, фактически увеличив доступные мощности на одну треть. Что касается предложения, то необходимо улавливать больше газа и использовать его на неэффективных электростанциях. И, наконец, Ирак должен воспользоваться своим богатым потенциалом возобновляемых источников энергии и увеличить долю солнечной

фотоэлектрической энергии (ФЭ) в структуре энергобаланса. Доведение доли возобновляемых источников энергии до 30% в поставках электроэнергии к 2030 году принесет экологические выгоды без увеличения общих затрат на поставку электроэнергии. По сравнению с сохранением нынешней структуры электроснабжения, снижение потерь в сетях и более активное использование газа и возобновляемых источников энергии позволит высвободить 9 млрд. куб. м газа для других целей в 2030 году, а также 450 тыс. баррелей в день (кб/д) нефти для экспорта. На рисунке (1) показаны возможные пути развития электроснабжения в Ираке до 2030 года.

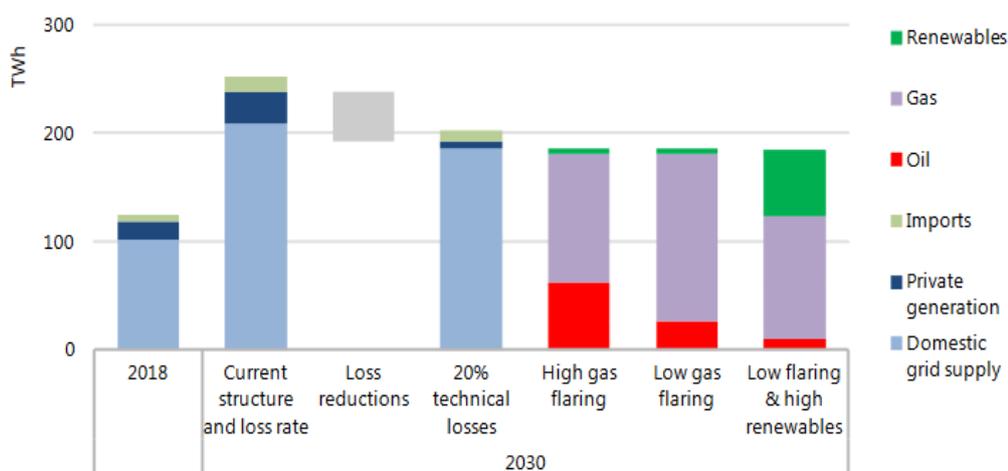
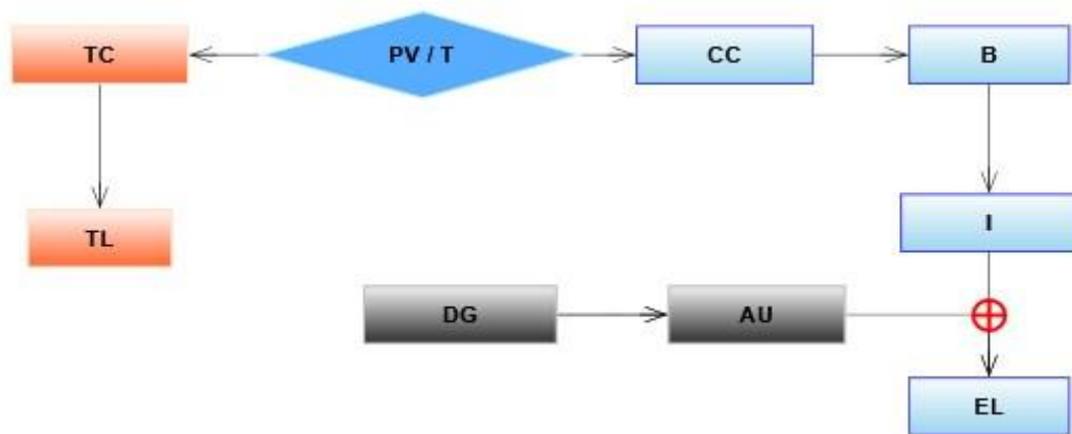


Рисунок 1. Потенциальные пути развития электроснабжения в Ираке до 2030 года.

Выбор оборудования для децентрализованных фотоэлектрических станций определяется инсоляцией и графиком потребления электроэнергии. Схема предлагаемой независимой гибридной фотоэлектрической установки с резервированием от дополнительного источника энергии – дизельного генератора – или централизованной сети представлена на рис.1. Схема отличается от обычной фотоэлектрической установки с электрохимическим аккумулятором электроэнергии и резервным дизель-генератором наличием тепловых нагрузок, которые питаются непосредственно от массива фотоэлектрических модулей через специальный тепловой контроллер



.Рисунок 1. Структурная схема фотоэлектрической системы с электрохимическим и электротепловым аккумуляторами

На рис. 1. приняты обозначения: PV/T – массив фотоэлектрических модулей; TL – тепловая нагрузка-аккумулятор; TC – тепловой контроллер; B – батарея электрохимических аккумуляторов; CC – контроллер заряда аккумуляторной батареи; I – инвертор; DG – дизельный генератор или другой энергоисточник; AU – блок автоматического включения резерва; EL – электрическая нагрузка.

Район исследования – столица Ирака, г. Багдад, находится на высоте 40 м над уровнем моря. Город расположен на 33° 20'19 "северной широты и 44° 23'38" восточной долготы. Удельная суточная инсоляция в районе Багдада по месяцам года для поверхности с оптимальным углом наклона относительно горизонтальной поверхности показана в Таблица. 1.

Месяц	янв	Фев	Март	Апр	Май	Июн	Июль	Авг	Сент	Окт	Нояб	Дек
Солнечная радиация, кВт ч / м ² / день	3	3,8	4,8	5,7	6,5	7,3	7,2	6,6	5,7	4,4	3,3	2,7

Табл. 1. Солнечная радиация в районе объекта энергообеспечения.

В качестве примера объекта энергообеспечения выбран социальный объект – спортивный зал. Зал имеет площадь 200 м² и рассчитан на 30 посетителей в день. Время работы зала – с 10 до 22 часов. Объект нуждается в электрической и тепловой энергии. Учитывая высокий энергетический потенциал солнечного излучения, рассмотрим

возможности фотоэлектростанции для энергообеспечения спортивного зала. Кроме электрической энергии, тренажёрный зал нуждается в горячем водоснабжении. Энергетические затраты на подогрев воды могут быть подсчитаны по формуле

$$P_t = m C_w (Q_2 - Q_1), \quad (1)$$

где t – время нагрева воды [с]; P – мощность нагревательного элемента [кВт]; m – масса воды [кг]; $C_w = 4,2$ кДж/кг град – удельная теплоёмкость воды; Q_2 и Q_1 – конечная и начальная температура воды.

В соответствии с нормативами расход воды в душевых спортивных залов – от 15 до 30 л на человека. Примем среднее значение – 22 л горячей воды, что суммарно для 30 посетителей рассматриваемого объекта составит 660 л/день. Энергия, необходимая для нагрева 660 л воды до температуры 65 градусов, равна:

$$W_{ГВ} = 660 * 4,2 * (65 - 13) = 144 \text{ кВт} \cdot \text{ч. (летом и весной),}$$

$$W_{ГВ} = 660 * 4,2 * (65 - 3,5) = 170 \text{ кВт} \cdot \text{ч. (зимой и осенью).}$$

Следовательно, средняя мощность электронагревательных приборов, при условии нагревания за световой день (весна–лето 13 часов, осень–зима 10 часов), равна, соответственно 11 и 17 кВт. Исходная температура воды принята летом 13°, зимой – 3,5°.

Срок службы фотоэлектрических модулей превышает 20 лет, нормативный коэффициент рентабельности $R_n = 0,05$. Срок службы аккумуляторных батарей серий DTM составляет до 12 лет, инвертора и контроллеров более 10 лет. Соответственно, за 20 лет эксплуатации количество единиц оборудования, кроме фотоэлектрических модулей, следует увеличить в два раза. Эксплуатационные затраты примем 100 000 руб./год.

Тогда, себестоимость электроэнергии фотоэлектростанции с гибридной системой аккумулирования составит:

$$C_{эл} = \{(0,05 * 5\ 181\ 000) + 100\ 000\} / 117\ 286 = 3,1 \text{ руб/ кВт} \cdot \text{ч}$$

Себестоимость электроэнергии варианта энергетического комплекса только с электрохимическим аккумулированием электроэнергии ФЭС составит:

$$C_{эл} = \{(0,05 * 6\ 329\ 800) + 100\ 000\} / 117\ 286 = 3,5 \text{ руб/ кВт} \cdot \text{ч}$$

По данным средний тариф на электроэнергию в Ираке равен 0,1 Евро, что по курсу соответствует 7,68 р./кВт*ч. Расчётная себестоимость электроэнергии фотоэлектростанции более чем в два раза ниже тарифа на электроэнергию от централизованной энергосистемы. Сравнивая себестоимость электроэнергии, производимой двумя вариантами фотоэлектрического энергокомплекса, видно, что вариант с гибридной системой аккумулирования фотоэлектричества экономически предпочтительнее. Годовые финансовые затраты на энергообеспечение спортивного зала,

потребляющего порядка 150 тыс. кВт*ч электроэнергии, при питании от централизованной электрической сети, составляют 1150 тыс. р. Использование фотоэлектростанции позволяет производить около 120 тыс. кВт*ч электроэнергии, сокращая потребление из электрической сети до 30 тыс. кВт*ч. При этом расходы на электроэнергию сокращаются до 600 или 650 тыс. р. в год для энергетического комплекса с гибридной системой аккумулирования фотоэлектричества или только с электрохимической, соответственно. Таким образом, годовая экономия финансовых средств на электроэнергию достигает для рассмотренных вариантов фотоэнергетического комплекса 500–550 тыс. р. в год, что обеспечивает окупаемость оборудования фотоэлектростанции (стоимость оборудования: 5181000 или 6329800 р. для рассмотренных вариантов) за 10–12 лет при расчётном сроке эксплуатации 20 лет. Следует отметить, что цена на возобновляемую электроэнергию будет уменьшаться и в дальнейшем из-за снижения стоимости оборудования для возобновляемой энергетики, что будет способствовать повышению экономической эффективности подобных проектов.

Показана перспективность использования фотоэнергетики для снижения нагрузки на энергодефицитную энергосистему Ирака и расходов на электроэнергию для конкретных потребителей. Материалы исследований, приведённые в диссертация, являются оригинальными и обладают научной новизной. Отличительными особенностями результатов по сравнению с известными публикациями по близкой тематике являются: обоснование применения электротепловых технологий для аккумулирования электроэнергии фото-электростанций, разработка МРРТ-алгоритма функционирования для тепловых контроллеров, разработка рекомендаций по построению фото-электростанций для обеспечения электрической и тепловой энергией социально-бытовых потребителей Ирака.

Основные результаты можно резюмировать следующим образом:

1. Использование систем накопления солнечной энергии с электрохимическими и тепловыми аккумуляторами позволяет снизить необходимый запас энергии электрохимических батарей за счет выделения энергии, потребляемой тепловыми нагрузками. Для рассматриваемого примера ёмкость аккумуляторных батарей удалось уменьшить в 2 раза. Использование части электроэнергии фотоэлектрических модулей для нагревания воды не позволяет осуществлять обратное преобразование низкопотенциальной горячей воды в электричество, но потребности объекта в горячем водоснабжении нивелируют этот недостаток.

2. Эффективность непосредственного преобразования электроэнергии массива

фотоэлектрических модулей в тепло выше, чем эффективность её теплового преобразования через промежуточное звено – электрохимический аккумулятор со своим коэффициентом полезного действия.

3. Удельная стоимость утилизации электроэнергии в виде тепловой энергии меньше стоимости аккумулирования в электрохимических аккумуляторах. Собственно, бак- утилизатор является электронагревательной нагрузкой, обеспечивающей горячее водоснабжение в любом варианте энергетического комплекса.

4. Работа показывает снижение стоимости гибридной (электротепловой совместно с электрохимической) системы аккумулирования электроэнергии по сравнению с электрохимическими батареями с тем же запасом энергии и, следовательно, более низкую стоимость электроэнергии, производимой фотоэлектрической станцией. Для рассматриваемого примера себестоимость фотоэлектричества при его гибридном аккумулировании равна 3,1 р., при электрохимическом – 3,5 р. за кВт*ч.