



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“

ФАКУЛТЕТ „МИННО-ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН“

КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИКА“

Маг. инж. Мирослав Любомиров Ангелов

**ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНАТА
ЕФЕКТИВНОСТ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ЦЕНТРАЛИ,
ПРИСЪЕДИНЕНИ КЪМ ПРЕНОСНАТА И
РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНАТА МРЕЖА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен

„ДОКТОР“

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика
Докторска програма по „Електроснабдяване и електрообзавеждане (по отрасли)“

Научен ръководител:

проф. д-р инж. Кирил Сталинов Джустров

СОФИЯ, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Електроенергетика и автоматика“ към “Минно-електромеханичен” факултет на МГУ „Св. Иван Рилски”, София, на 03.02.2026 г., и насочен за защита към Научно жури.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, на 15.05.2026 г. от 13:30 часа в зала 204Б на МГУ „Св. Иван Рилски”, за присъждане на образователна и научна степен „ДОКТОР“

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация” на МГУ „Св. Иван Рилски”, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. Проф. д-р инж. Васил Димитров;
2. Доц. д-р инж. Орлин Петров;
3. Проф. доц. д-р инж. Радослав Кючуков;
4. Доц. д-р инж. Свилен Рачев;
5. Доц. д-р инж. Мила Илиева-Обретенова.

Резервни членове:

1. Проф. д-р инж. Ивайло Стефанов Стоянов;
2. Доц. д-р инж. Теодора Василева Христова;

РЕЦЕНЗЕНТИ:

.....
.....

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Електроенергетика и автоматика“ на факултет “Минно-електромеханичен”.

Автор: маг. инж. Мирослав Любомиров Ангелов

Изследване и анализ на електроенергийната ефективност на фотоволтаични централи, присъединени към преносната и разпределителната мрежа

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Дисертационният труд обхваща 4 глави с общ обем от 162 печатни страници, в това число и списък на използваната литература, съдържаща 220 заглавия. В автореферата всички означения, номерацията на формулите, фигурите и таблиците са според означенията в дисертацията.

1. Актуалност на проблема

Понастоящем ВЕИ надхвърля 26% в енергийния микс на страната, което предвид амортизираните и неразчетените за голям товар мрежи е сериозна предпоставка за възникване на проблеми, свързани с нарушаване на устойчивостта и надеждността на електроенергийната система (ЕЕС). Изграждането на огромни по мощност фотоволтаични паркове в страната върху плодородни обработваеми земи е лошо и нецелесъобразно решение. Такъв подход създава проблеми на мрежовата инфраструктура по отношение на регулиране режимите на натоварване и преразпределение на енергията, плащат се високи такси за пренос на дълги разстояния и се получават големи загуби на мощност и ел. енергия (ЕЕ), а също така възниква небалансирано потребление, т. к. производството и консумацията на ЕЕ са локализирани на различни места, много често твърде отдалечени. В това отношение значително по-благоприятно и ефективно решение се оказва децентрализираното производство, при което генерацията и консумацията се осъществяват почти на едно и също място, като ефективността на този подход значително нараства с прибавяне и на системи за съхранение на енергията. Конвенционалните източници като АЕЦ, ТЕЦ, КЕЦ и др. осигуряват базовите мощности за всяка ЕЕС и в съчетание с ВЕИ се получава ефективна симбиоза, гарантираща сигурност, гъвкавост и устойчивост. При настъпване на аварийни ситуации, респективно преходни процеси, за постигане на добра устойчивост на системата, е необходимо вятърните ел. централи (ВяЕЦ) и фотоволтаичните централи (ФВЦ) да осигуряват необходимата инерция за поддържане на честотата и напрежението, както е при синхронните генератори (СГ). В тази връзка в Европейския съюз е разработен регламент ЕС 2016/631, в който са залегнали изисквания за работата на ВяЕЦ и ФВЦ, представени синтезирано по-долу:

- Faultride trough capability, т.е. способност за не прекъсване на генерацията при настъпване на аварийна ситуация;
- Непрекъснато поддържане на определени нива на характеристиките $U - \frac{Q}{P_{max}}$ и $P - \frac{Q}{P_{max}}$;
- Synthetic inertia, т.е. създаване на изкуствен (виртуален) инерционен момент при аварийни ситуации;

- Осъществяване на автоматично регулиране на напрежението съвместно с конвенционалните източници;
- При аварийни ситуации споделено участие заедно с конвенционалните източници, в свръхпреходния ток на ЕЕС;
- Поддържане на генерацията при динамично изменение на честотата;
- При повишаване на честотата осигуряване на автоматично понижаване на мощността;
- Осигуряване на функционална възможност за генериране и консумиране на реактивна енергия.

Понастоящем в повечето от изградените в страната ВЯЕЦ и ФВЦ, посочените по-горе изисквания не са заложили в пълна степен на ниво проектиране и не са реализирани в процеса на експлоатация. Това предполага да се потърсят допълнителни функционални възможности за подобряване на ефективността и устойчивостта на тези системи. Вече са създадени многофункционални инвертори от висок клас – т. н. grid forming, които възпроизвеждат редица функции на СГ, като например регулиране на напрежението и честотата, инерционност на системата и др. системни параметри, с които мрежите стават стабилни, устойчиви и гъвкави. Батериите от ново поколение създават стабилен резерв и осигуряват първично регулиране и възстановяване след авария. Освен това те доставят реактивна мощност за компенсация на реактивните товари., с което съществено намаляват загубите на активна мощност и ЕЕ. Следователно, в комбинация със стабилните и надеждни конвенционални генериращи източници (АЕЦ, ТЕЦ, газовите централи и др.), ВЕИ и системите за съхранение създават една модерна, перспективна и устойчива електроенергийна система на страната.

Европейските цели до 2030 г. за 40% намаление на емисиите спрямо 1990 г. са 27% дял на ВЕИ от енергийното потребление и 27% подобрене на енергийната ефективност. До началото на 2025 г. дялът на ВЕИ в енергийното потребление е едва 16.3% от общото енергопотребление в страната. Останалите два показателя са в още по-незадоволително състояние. В тази връзка е необходимо да се разработят такива процедури, алгоритми, указания и наредби на институциите, насочени към максимално използване на капацитета на инсталираните ВЕИ, респективно ФВС и в тази насока е настоящата разработка.

2. Цел и задачи на дисертационния труд

Въз основа на задълбочено проучване на ползите и перспективите за развитие на слънчевата енергетика в световен и национален мащаб, както и на прилагане на критичен и експертен подход относно технико-икономическите проблеми при изграждане и експлоатация на ФВС и съобразно одобрено задание и план на дисертационната работа, е формулирана следната цел на настоящата разработка:

Да се изследва и анализира електроенергийната ефективност на ФВЦ, както и възможностите за развитие, рационализиране и оптимизирането им.

За постигането на тази цел трябва да се решат следните задачи:

- 1. Да се проведе задълбочено проучване на литературни източници, свързани с тематиката на дисертационната работа и се маркират основните проектни особености, компоненти и параметри, оказващи съществено влияние върху електроенергийната ефективност.*
- 2. Да се проведе изследване в теоретичен план на различни постановки, инструментариуми и методики за оценка, анализ и прогнозиране на електроенергийната ефективност на ФВС.*
- 3. Да се проведат теоретични и експериментални изследвания на технико-икономическите възможности на реални обекти за постигане на висока електроенергийната ефективност при изграждане на ФВС.*
- 4. Да се изследват и анализират перспективите за развитие, рационализиране и оптимизиране на енергетичните процеси на ФВС по критерии „електроенергийната ефективност“.*

3. Обект на изследване

В настоящата работа е представено изследване на традиционно изграждане през последните 10-15 години фотоволтаични системи (ФВС) като са приложени аналитични и експериментални подходи за оценка и оптимизиране на различни параметри и енергетични характеристики. Проучени са 14 ФВЦ с мощност от 100 kW_p до 18 MW_p, разположени в югоизточната част на страната, за които са определени технико-икономическите възможности за постигане на висока електроенергийна ефективност в процеса на експлоатация. Набелязани са тенденциите за рационализиране и са маркирани критериите за оптимизиране режимите на работа на изследваните обекти. Резултатите от работата могат да се използват от проектантите и експлоататорите за подобряване на икономическите и техническите показатели на ФЕЦ.

4. Методи за изследване

Въз основа на мониторинг и систематизиране на техническите характеристики на изследваните обекти е създадена информационна основа за апробиране на конкретни изследователски методи. Моделирането на енергетичните процеси е извършено с помощта на апарата на теорията на вероятностите и математическата статистика. Теоретичният подход и съставянето на научно обосновани заключения се базира на прилагане на двуфакторен дисперсионен анализ. Икономическите анализи са направени въз основа на регламентирания от ЕС

метод „полза-разход“. Апаратурните изследвания са проведени с помощта на прецизни мрежови анализатори, компютърни и микропроцесорни системи.

5. Нови научни резултати

1. Анализирани са литературни източници, свързани с проектиране, изследване, и експлоатация на ФВС. Формулирана е прогресивна стратегия за всеобхватно използване на различни технологии, характеристики и външни фактори в проектантския и изследователския процес. Анализирани са съвременни тенденции за развитието и усъвършенстването на PV модулите, инверторите и батериите по критерий “ЕЕЕ” и с отчитане на работните режими и условията за безопасност. Разработен е критичен експертен анализ на технико-икономическите проблеми при изграждане и експлоатация на ФВС, включително и във връзка с ниската използваемост на ВЕИ в страната.
2. Анализирани са теоретико-практични постановки и са набелязани и утвърдени условията за отдаване на максимална мощност от PV системите, включително и при частично засенчване. Представени са прогресивни комплексни показатели, т.н. “гъвкави методи” и са дефинирани предимствата на “общностите за ВЕИ”. Разработени са икономически прогнози за разходите, ползите и вредите от ВЕИ и е формулиран метод за оценка на ЕЕЕ на база стратегията “полза-разход”. Въз основа на дисперсионния анализ е синтезиран теоретичен подход за изследване влиянието на различни фактори върху ИП, даващ възможност за обосноваване на практически решения.
3. Установено е ускорено развитие на пазарните механизми, мениджмънта, маркетинга, растежът на работните места и инвестициите, а също така на цифровизацията, рециклирането, ел.транспорта, ефективността, термопомпите и др. сектори с използване на слънчева енергия. Доказано е, че новите технологични продукти при гъвкавите технологии осигуряват приходи, правят енергията “по-зелена” и увеличават живота на батериите. Прилагането на метода “полза-разход”, използващ концепцията на “дисконтирането”, представлява иновативна стратегия за прогнозиране на икономически показатели и апробирането му в изследователския процес потвърждава високо-ефективните му възможности.
4. Представен е комплексен анализ за развитието на ФВС, за тяхното диагностициране, набелязване на основните експлоатационни проблеми и за създаване на нови поколения PV модули, инвертори и батерии по критерий икономичност и надеждност, както и за внедряване на автоматизирани и роботизирани системи в процеса на експлоатация. За конкретна ФЕЦ с мощност 2 MWp и за останалите изследвани инсталации, са проведени изследвания и е регистрирана динамиката на слънчевата радиация и температурата в денонощен, месечен и годишен разрез. Установена е влошена

работа на инверторите в резултат на което ефективността е с ниски стойности. ЕЕЕ се определя в съответствие с разработен за целта алгоритъм, като е констатирано несъответствие в генерираната през по-хладните и слънчеви месеци енергия и тази на летните горещи месеци, в следствие неефективна работа на инверторите. С прилагането на дисперсионен анализ в двуфакторно пространство, се установи влиянието на факторите върху ИП. На база на резултати от обективни изследвания е констатирано и доказано доминиращото влияние на фактора, свързан с експлоатационните характеристики на ФЕЦ. Потвърдено е и същественото влияние на ефекта от съвместното действие на двата влияещи фактора.

6. Реализация в практиката

Резултатите от проведения изследователски процес и формулираните методики и методически указания могат да се използват както в проектантската практика, така и за подобряване на експлоатационните характеристики и режимните параметри на действащите ФВС. Основният ефект от практическото приложение на резултатите на научния труд е повишаване нивото на генерираната ел. енергия и подобряване на нейното качество.

7. Аprobация на работата

Основните резултати в дисертацията са докладвани на престижни международни конференции в страната и чужбина. По дисертационния труд има общо 11 публикации.

8. Обем и структура на дисертационната работа

Дисертационният труд е структуриран в увод, четири глави, претенции за приноси, публикации на автора по дисертационния труд и използвана литература. Общият обем на дисертацията е 162 страници.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА - ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ В СЪОТВЕТСТВИЕ С ТЕМАТИКАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Практическо проектиране на фотоволтаични системи (ФВС)

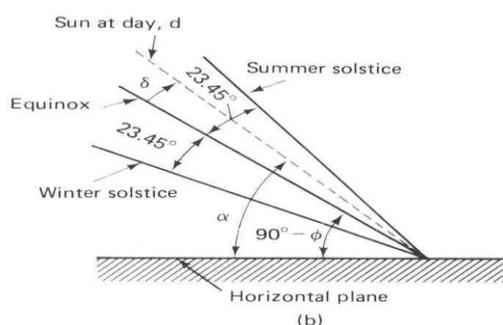
Общи енергетични характеристики

Проектирането на ФВС започва с дефинирането на заданието. То съдържа информация за мощността на централата, характеристиката на терена, географските координати, надморска височина, климат, скорост на вятъра, температурен диапазон, валежи.

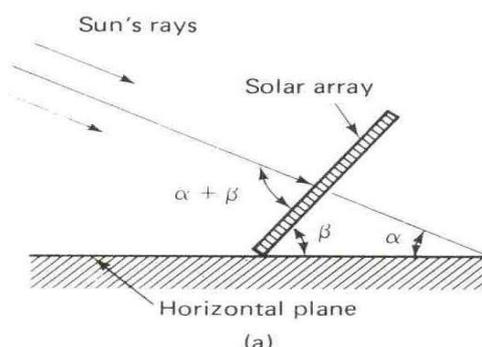
Оценка на климатичните и радиационни условия.

Изборът на подходящо място предполага получаване на данни за годишната сума на слънчевата радиация G , $kWh/год.$, които могат да бъдат получени чрез непосредствено измерване или на базата на данни за предходни години. Изходната енергия на фотоволтаичната система е право пропорционална на слънчевата радиация, но влияние оказват и други фактори, като температура, вятър, количество на валежите, топография на района. Обикновено данните се дават като количество на глобалната радиация за единица хоризонтална площ – R [66]. Възможно е да има данни и за дифузната съставляваща – D . За да се превърнат тези данни в радиация върху повърхност, различна от хоризонталната, се приемат някои допускания. Приема се, че основната дневна радиация върху хоризонтална повърхност е:

$$S = R - D \quad (1.1)$$



Фиг. 1.1. Ъгъл на падане на слънчевите лъчи α



Фиг. 1.2 Слънчева радиация попадаща върху повърхност наклонена под ъгъл β

От фиг. 1.1. следва, че директната компонента на слънчевата радиация върху повърхност, наклонена под ъгъл β спрямо хоризонта, е:

$$S_{\beta} = S \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} \quad (1.2)$$

където: α – ъгъл на падане на слънчевите лъчи се дава от израза:

$$\alpha = 90 - \Phi \pm \delta \quad (1.3)$$

Знакът плюс в (1.3) се използва за северното полукълбо, а знакът минус – за южното, Φ е географската ширина, а δ е отклонението на слънцето:

$$\delta = 23,45^{\circ} \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (d - 81) \right] \quad (1.4)$$

където: d е броят на дните от началото на годината.

Приемайки, че дифузната радиация D не зависи от наклона на повърхността, общата радиация се дава чрез израза:

$$R_{\beta} = S \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} + D \quad (1.5)$$

Определяне на необходимото количество енергия.

В случаите, когато системата се оразмерява за захранване на определен товар, нейната мощност се съобразява с консумацията на товара. При свързани в мрежата системи такава оценка не е необходима [41]. Получената мощност от един модул (генератор) може да бъде изчислена по следния начин [88,90].

Основна дневна изходна енергия на модул:

$$WDB = G \cdot \eta_{mod} , \text{ kW/m}^2 ,$$

където: η_{mod} - к.п.д. на модула; G , kW/m² – основна дневна слънчева радиация върху наклонена повърхност.

Обща дневна изходна енергия от модул:

$$WD = 0,98 \cdot G \cdot \eta_{mod} , \text{ kW/m}^2/\text{ден},$$

където се приема, че пълните загуби в генератора са 2%.

Необходима площ на PV модулите:

$$A = \frac{W_{el}}{0,98 \cdot G \cdot \eta_{mod}} , \text{ m}^2$$

където: W_{el} – необходима дневна консумация от отвара.

Брой на модулите:

$N = A/a$ (трябва да бъде цяло число), където: a , m² – площ на стандартния избран PV модул.

Избор на PV модули и техните характеристики

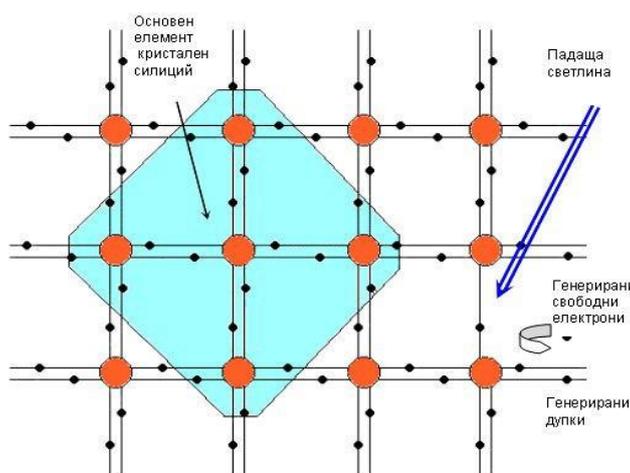
Обикновено се работи с един тип модули, като избора се прави на база максимална икономическа ефективност. Дава се предварителна ориентировъчна икономическа оценка на срока на откупване чрез отношението €/Wp. В оценката се включват и носещите конструкции, окабеляването, терена, централните инвертори и др. разходи. Възвращаемостта на съоръжението се определя чрез приетия от ЕС метод “полза-разход”.

Фотоволтаичните клетки (елементи) преобразуват слънчевата светлина в електричество. Този ефект е открит от Бекерел през 1839 г. Първият полупроводников елемент, показващ този ефект, е създаден през 1877 г. През 1954 г. в лабораториите на А. Бел се демонстрира фотоелектричният ефект в силициев елемент, с което се поставя началото на идеята за производство на полезно електричество от соларни клетки. Два факта са важни за принципа на действие на соларните клетки [41]:

- *Слънчевата светлина е съставена от фотони с различна енергия;*
- *Фотоните могат да си взаимодействат с атоми и ако фотонът има достатъчна енергия, той може да разруши връзката между електрон и атом.*

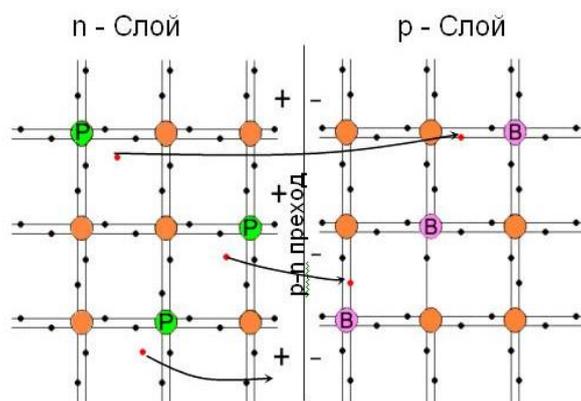
Светлината с достатъчна енергия може да отдели електрон от неговата връзка в кристала, създавайки положителен заряд - дупка (липсващ електрон във връзката) и свободен електрон.

Тези положителни и отрицателни заряди, които се движат свободно в кристалната решетка, създават електричеството [фиг.1.3].

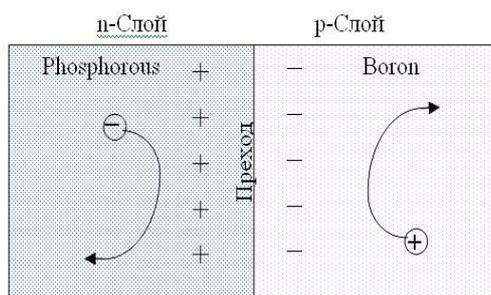


Фиг. 1.3. Принцип на действие на силициев фотоелемент

Способността на соларната клетка да произвежда електричество се дължи на възможността веднъж отделените от атома електрони да заемат отново своето място като валентни в даден атом. Резултантният поток от движението на електроните представлява фото тока. За да се покажат основните принципи на фотоволтаичното преобразуване се използва като пример клетка от чист моно кристален силиций, който е от четвърта валентност. При него всеки от валентните електрони образува връзка с валентен електрон от съседен силициев атом. Тази връзка между електроните е много здрава и в идеалния кристал няма свободни валентни електрони, които да се свържат с друг електрон. Електроните са свързани чрез валентна връзка в двойки и чистият моно кристален силиций е много лош проводник, защото в него липсват свободни електрони. За получаването на фото ток, соларните клетки са конструирани като батерия, чрез формиране на р-п преход в силициев кристал (фиг. 1.4.). За да се получи слънчева клетка в силиция, приблизително $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ акцепторни атома (атоми на елементи от трета валентност, например бор) или приблизително $10^{19}/\text{cm}^3$ донорни атома (атоми на елементи от пета валентност, например фосфор) се добавят в противоположните страни на силициевия кристал. Когато фосфорът се добави към силициевия атом, четири от валентните му електрони се свързват в здрава връзка с четирите силициеви електрона, и остава един свободен електрон. Този електрон се движи свободно в кристалната решетка в зоната на фосфорния атом. Силицият, който съдържа голям брой атоми с по един свободен електрон се нарича n-тип силиций. Ако един атом бор се добави към силиция, три валентни електрона образуват здрава връзка със съседните силициеви електрони, но има един силициев електрон, търсещ друг електрон, с който да се свърже. Този липсващ електрон се нарича дупка. Тъй като дупката е липсващ електрон, може да бъде разглеждана както свободния електрон, когато е добавен фосфор, но тя е с положителен заряд. Силиций, съдържащ голям брой атоми с липсващи електрони, се нарича р-тип силиций. Процесът на добавяне на атом бор или фосфор към силиция се нарича легиране. Често се получава чрез термодифузия. Когато n- и р-тип силиций влязат в контакт, електроните се придвижват от n-слоя към р-слоя. Това води до образуването на положителен заряд в n-слоя на р-п прехода и отрицателен заряд в р-слоя [41].

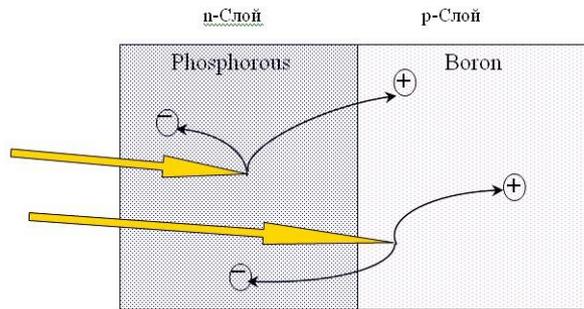


Фиг. 1.4. Структура на силициев фотоелемент



Фиг. 1.5. Образуване на p-n преход в полупроводниковия елемент

Слънчева батерия се получава когато n- и p-тип силицият формират вътрешно кристална граница – p-n преход (фиг. 1.5). Излишъкът от положителни и отрицателни заряди от двете страни на прехода създава електрическо поле. Интензитетът на това поле зависи от количеството на примесите в силиция. При равновесно състояние електрическото поле възпрепятства допълнителното преминаване през p-n прехода на дупки от p- слоя и електрони от n-слоя. Излишните електрони от фосфора се привличат от дупките, създадени от легирането на силиция с бор. Близко до p-n прехода дупките от p-слоя се запълват със свободни електрони от n-слоя формирайки здрава връзка. Това води до преместване на заряд, което създава електрическо поле в материала. Докато p-n прехода е дебел само няколко атома, резултатното електрическо поле създава бариера, която предотвратява допълнителното преминаване на дупки от p-слоя и електрони от n-слоя. Това електрическо поле, създаващо електродвижещо напрежение – е.д.н. (около 0,5V), прави възможно протичането на фототок, когато светлинната енергия разруши валентни връзки. Когато фотон достигне материала и разруши валентна връзка се образуват отрицателен електрон и положителна дупка. Ако те не се намираха в електрическо поле, биха се привлекли и рекомбинирали. Под действие на електрическото поле електроните се насочват в едната посока, а дупките - в другата. Това представлява източникът на електричество в една соларна клетка (фиг. 1.6).

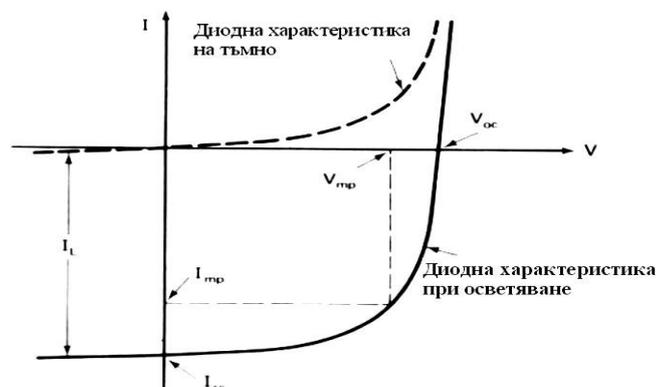


Фиг. 1.6. Генериране на фототок

Когато слънчевата светлина попада върху клетката, създава носители на заряд (електрони и дупки), електрическото поле отблъсква новите електрони в едната посока на прехода, а новите дупки в другата. Този процес на отделяне е причината за движение на носителите на заряда в електрическа верига. Минималната енергия, която е необходима за отделянето на електрон, представлява така наречената забранена зона. Фотони с енергия по-малка от забранената зона няма да отделят електрони. Фотони с енергия по-голяма от необходимата за отделяне на електрон въздейства на електроните и дупките с по-голяма кинетична енергия. Когато слънчевата клетка се загрева, електроните и атомите трептят по-бързо и ефективността на електрическото поле при разделянето на електроните и дупките намалява. Произволно насочената кинетична енергия става главният фактор, управляващ движението на електрони и дупки. Типичното намаляване на ефективността на слънчевата клетка е около $0.1\% / ^\circ\text{C}$ нараснала температура на клетката. Така за соларна клетка с ефективност 16% при 25°C , тя ще намалее на 9% при температура 100°C [41].

Характеристики на фотоволтаичните елементи

Фотоволтаичните преобразуватели се описват чрез диодната волт-амперна характеристика (ВАХ). За генерирането на фототок е необходимо полупроводниковият елемент да бъде облъчен със светлина, като за протичането на този ток е необходимо създаването на външна електрическа верига [фиг. 1.7].



Фиг. 1.7 Волт-амперна характеристика на фотоволтаичен елемент

Този светлинно генериран ток се изобразява чрез волт-амперна характеристика на диода в четвърти квадрант, в която зона може да бъде генерирана електрическа енергия. Обикновено се използват три параметъра за характеризиране работата на соларните клетки (фиг. 1.7.). В литературата се срещат различни интерпретации за изразяване на тези параметри [66], които се различават в своята детайлност. Първият параметър е токът на късо съединение I_{sc} (short circuit current). В идеалния случай той е равен на светлинно генериран ток, който се дава от израза:

$$I_L = q \cdot A \cdot g \cdot (L_e + W + L_h) \quad (1.6)$$

където: $q = 1.602 \times 10^{-19}$ – заряд на електрона; A – ефективно сечение на диода; g – ниво на генериране на двойката електрон-дупка; L_e , L_h – дифузионна дължина съответно на електроните и дупките; W – ширина на забранената зона.

Вторият параметър е напрежението на празен ход U_{oc} (open circuit voltage). То се получава, когато токът е равен на нула, и се определя по формулата:

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1.7)$$

където: $k = 1.380 \times 10^{-23}$ J/K – константа на Болцман; T – температура, $\frac{kT}{q} = U_T = 0.02586$ V (при 3000K) - температурно-зависимо напрежение; I_0 – ток на насищане на диода.

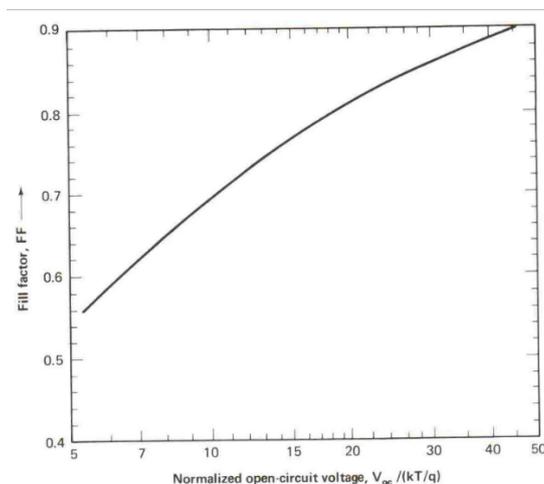
Изходната мощност във всяка работна точка във четвърти квадрант от фиг. 1.7. е равна на площта на правоъгълника означен с прекъсвана линия за дадена работна точка. Работна точка, получена при U_{mp} и I_{mp} , се нарича точка на максимална мощност – MPP (maximal power point).

Третият параметър е т. нар. коефициент на запълване FF (fill factor), който се дефинира като:

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.8)$$

Този параметър показва доколко “квадратна” е волт-амперната характеристика. За фотоволтаични клетки със значителна ефективност този коефициент има стойности от 0,75 до 0,85. В идеалния случай той е функция само на напрежението на празен ход – U_{oc} . Въвеждайки напрежението U_0 като съотношение на напрежението на празен ход U_{oc} към температурното

напрежение $UT = kT/q$, идеалното максимално ниво за коефициента на запълване FF е показано на фиг.1.8.



Фиг. 1.8. Идеално ниво на коефициента на запълване FF като функция на U_{oc} към kT/q

Ефективността на преобразуване (к. п. д.) се дава като:

$$\eta_{PV} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} = \frac{U_{oc} \cdot I_{cs} \cdot FF}{P_{in}} \quad (1.9)$$

където : P_{in} е общата мощност на слънчевата радиация попадаща върху клетката.

Тези параметри, както и волт-амперните характеристики на модулите, се дават от фирмите производители, но при т. нар. стандартни условия на изпитване STC (standard test conditions), които са: слънчева радиация $G = 1000 \text{ W/m}^2$, температура на модула $T = 25^{\circ}\text{C}$ и въздушна маса $AM = 1,5$.

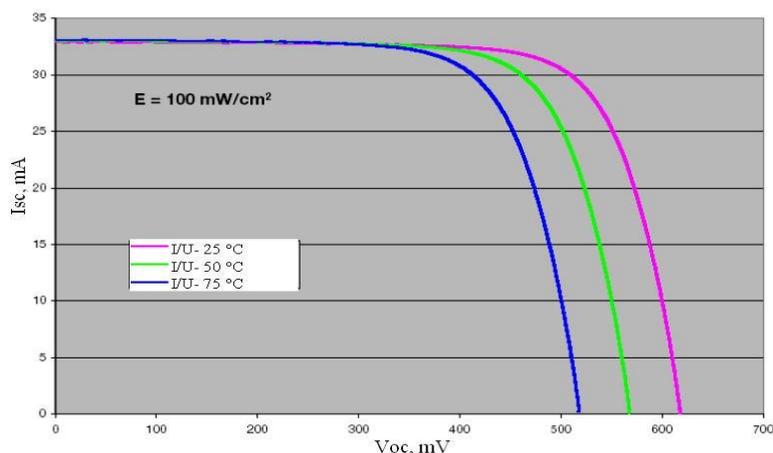
Друг начин за представяне на ефективността η_{PV} [78,81] е чрез изразяване на зависимостта от температурата на околната среда T_a и слънчевата радиация G_{β} в повърхността на модул, наклонен под ъгъл β :

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} \left[1 - \beta(T_{cell} - T_{cell,ref}) + \gamma \log \left(\frac{G_{\beta}}{G_{\beta,ref}} \right) \right] \quad (1.10)$$

където: T_{cell} - температура на PV клетката; η_{ref} - референтна ефективност на модула при температура на клетката, $T_{cel,ref} = 25^{\circ}\text{C}$ и при слънчева радиация в повърхността на модула $G_{\beta} = 1000 \text{ W/m}^2$; γ и β - коефициенти на слънчевата радиация и температурата, които зависят от материала.

Този метод за определяне ефективността на фотоволтаичното преобразуване дава задоволителни резултати, ако модулите не са интегрирани в покривни конструкции, поради особености при отчитане влиянието на вятъра. Моделът може да бъде използван за моделиране на кристално-силициеве модули. За тънкослойни модули влиянието на температурата е по-слабо.

Друга характеристика, която някои производители дават, това е зависимостта на напрежението, респективно на мощността, от температурата (фиг. 1.9).



Фиг. 1.9. ВАХ на соларна клетка в зависимост от температурата

Според [82] това изменение на напрежението, респективно на мощността, е с 0,4% за 1⁰С. Според други автори [66] температурният пад на напрежението за силициев фотоелемент може да бъде пресметнат по формулата:

$$\frac{dU_{oc}}{dT} = \frac{U_{go} - U_{oc} + \gamma \cdot \left(\frac{kT}{q} \right)}{T} \quad (1.11)$$

където: $U_{go} = E_{go}/q$; E_{go} – линейно екстраполирано ниво на връзката на силиция; γ – коефициент отчитащ температурната зависимост на параметрите определящи I_0 . Изменя се в границите от 1 до 4. За силиций $U_{go} \approx 1,2$ eV, $U_{oc} \approx 0,6$ V, $\gamma \approx 3$, $T = 300$ K и температурният пад на напрежението има стойност:

$$\frac{dU_{oc}}{dT} = -2,3 \text{ mV / } ^\circ \text{C} \quad (1.12)$$

Получаването на работните характеристики на фотоволтаичните преобразуватели за условия различни от стандартните STC, е важна задача и е

предмет на изследване от редица изследователи. Начините за реализация на тези изследвания са различни, като се започне от обикновената A-V измервателна схема и се стигне до използваните днес специализирани компютъризирани измервателни системи (PV I-V Curve Analyser) [77].

В първа глава са разгледани още въпросите, свързани с избора на ел. схема за ФВС, характеристиките, изискванията и видовете мрежови инвертори, както и видовете батерии, техните експлоатационни и монтажни особености, препоръки за пускане в действие и безопасност при експлоатацията.

Критичен експертен анализ на технико-икономическите проблеми при изграждане и експлоатация на ФВС в световен и национален аспект

Проучване на Института за глобална устойчивост в Бостън върху 662 проекта за енергийна инфраструктура от 83 страни от всички континенти, построени в периода 1936-2024 г. на стойност 1,358 трилиона долара показва, че в над 60% от случаите бюджетът на проектите е чувствително превишен. Оценката е направена върху 10 вида проекти [123]:

- *ТЕЦ на въглища, нефт или природен газ;*
- *Ядрени реактори (АЕЦ);*
- *Водно-електрически централи (ВЕЦ);*
- *Вятърни паркове в търговски мащаб (ВяЕЦ);*
- *Мащабни ФВЦ и концентрирани слънчеви инсталации;*
- *Високо волтови преносни линии;*
- *Биоенергийни централи (БЕЦ);*
- *Геотермални електроцентрали (ГТЕЦ);*
- *Съоръжения за производство на водород;*
- *Съоръжения за улавяне и съхранение на въглерод.*

Електроцентралите са с мощност над 1 MW, преносните линии са с дължина над 10 km и проектите за улавяне и съхранение на въглероден диоксид са с повече от 100 тона на година. Оценено е повишението на инвестициите и забавянето във времето на проектите като е констатирано, че средно изграждането на енергиен проект струва 40% повече от очакваното и отнема почти две години повече от планираното. Най-съществени са негативите при атомните централи, като средната АЕЦ има превишение на разходите от 102,5% и струва с 1,56 милиарда долара повече от очакваното. Следват ВЕЦ с превишение на разходите 36,7%; ГТЕЦ (20,7%); улавяне на въглерод (14,9%); биоенергия (10,7%); ВяЕЦ (5,2%); и съоръжения за водород (6,4%). По отношение на закъснение на строителството ядрената, водната и геотермалната енергия имат средно

закъснение съответно 35, 27 и 11 месеца. ФВЦ и преносните инфраструктури имат по-ниски разходи от предвидените в бюджета съответно (-2,2%) и (-3,6%), като тези проекти много често завършват предсрочно. Проектите с капацитет над 1,561 MW имат значително по-висок риск от ескалация разходите и времето за строителство, докато по-малките проекти на ФВЦ практически се реализират с намален финансов риск и предлагат по-добра предвидимост на бюджета. Установено е, че ако периодът на строителство надхвърли закъснение от 847,5%, темпът на увеличение на разходите се увеличава значително над 50% [22,24,58,123].

Понастоящем актуалното състояние на енергетиката в Европа може да бъде олицетворено чрез едно ръкуване между Фон дер Лайен и Тръмп в Шотландия, което обеща Европа да купува американски петрол, газ, въглища и ядрена енергия за 250 милиарда долара годишно в продължение на три години (общо 750 милиарда долара). Ако тези милиарди се вложат за фотоволтаици какво би се постигнало? При средна цена от 10 евроцента на ват бихме инсталирали в нашата Европа около 682 GWh PV модули, които да произвеждат през следващите 25 години близо 1 милион GWh годишно, което означава пълна автономност и енергийна сигурност. През 2024 г. ЕС е внесъл от САЩ около 573 млн. барела нефт, равняващи се на 974 TWh; 35 млн. тона втечен природен газ (473 TWh); 13 млн. тона въглища (84 TWh) или общо 1530 TWh първична енергия. За 25 г. с помощта на фотоволтаиците бихме произвели 25 млн. TWh, което е около 17 пъти еквивалента на изкопаемата енергия, внесена от САЩ днес. Ако се отчете работната заетост, при която всеки фотоволтаичен мегават генерира между 4 и 6 преки и косвени работни места, с 682 000 MW ще се създадат над 3 млн. квалифицирани работни места, разпределени по цяла Европа. Проектанти, инженери, монтажници, експлоататори, местни фирми, енергия, която дава заплати, а не дивиденди на Еххон Mobil. По отношение на въглеродния отпечатък всеки MWh, произведен от изкопаеми горива, отделя средно 500 кг. въглероден диоксид. След 25 г. фотоволтаичните централи, построени с тези 750 милиарда долара ще избегнат емисии на 12,5 милиарда тона въглероден диоксид. Но неадекватните европейски политици избраха да финансират тексаските кладенци и американския газ, вместо да имат ясна, автономна и ориентирана към бъдещето визия. Това е въпрос на идентичност и на лидерство политиките да имат воля да се държат не като васали, защото нямаме нужда от изкопаемите горива на Тръмп, а се нуждаем от слънце, мозъци и интелект [122,173].

Този нов план на ЕС за закупуване на американска енергия за 250 милиарда за всяка от следващите години със сигурност ще изложи на сериозен риск енергийната сигурност на блока. Предвижда се, според плана, Европа да инвестира в САЩ 600 милиарда долара, но сумата от 750 милиарда за три години

поставя под въпрос усилията за енергиен преход и изграждането на 700 GW фотоволтаици. През първата половина на 2025 г. 55% от вноса на втечен газ в ЕС е от САЩ, 16% от Русия, 9% от Катар, 6 % от Нигерия и 5% от Алжир. Споразумение от 250 милиарда долара годишно обвързва енергийните доставки на съюза с един доставчик, което вече се случи с Русия. Тези 750 милиарда при втори вариант ако се вложат за инсталиране на 321 GW слънчева и 225 GW вятърна енергия, капацитетът на ВЕИ ще се увеличи с 90 %, т.е. почти два пъти в сравнения със сегашния. В резултат на арогантността и наглостта на Тръмп европейските лидери се оказаха безсилни и неспособни да защитят позициите на съюза. Европа внася стоки в САЩ за 240 милиарда долара и услуги за 148 милиарда и може да се противопостави като въведе повишени данъци и други ограничения на американските технологични гиганти [160]. При децентрализираното производство на ЕЕ, каквито са ФВС, генерацията и консумацията се извършват почти на едно и също място и мрежите СН и ВН могат да се сведат до минимум. По този начин освен големите експлоатационни разходи за поддръжка на тези мрежи, отпадат условията и предпоставките, свързани със загубите на мощност и енергия, действията по диспечеризация на различни процеси, АЧР, регулиране на напрежението, компенсация на реактивните мощности и мн. др. Състоянието на ВЕИ в страната във връзка с европейските цели до 2030г. за 40% намаление на емисиите спрямо 1990 г., 27% дял на ВЕИ от енергийното потребление и 27% подобрене на енергийната ефективност, е незадоволително. В момента дялът на ВЕИ е само 16,3 % от общото електропотребление, а другите два показателя са в още по-незадоволително състояние. ВЕЦ в мощностната структура е с най-голям дял – около 25% от общата инсталирана мощност, но генерираната електроенергия е само 8,5 % в този микс. При ФВС това съотношение е 8,7 % към 3,6 %, т.е. произведената енергия е около 2,5 пъти по-малка от мощностните възможности. При вятърните централи съотношението е 5,5 % към 3,6 %. Следователно използваемостта на ВЕИ е много ниска [31]. Причините за тези аномалии са не само в сезонния и дневния характер на ВЕИ, но основно се дължат на спекулативни и егоистични действия на ЕРП-тата, които контролират баланса от закупена и продадена енергия в своя полза, без да се съобразяват с националните интереси [1,46].

Във връзка с Националния план за възстановяване и устойчивост (НВПУ) и финансирането на общините за изграждане на ефективно улично осветление (УО) с близо 125 млн. лв. е установено, че съществуват някои принципни неясноти и несъответствия. Целта на предложената програма всъщност е да се постигне не по-малко от 30% спестяване на електроенергия (ЕЕ) за УО чрез използване на LED осветление и изграждане на фотоволтаични системи (ФВС) със батерии за хранването на УО.

В условията за кандидатстване на процедурата се регламентира, че съществува ограничение за ползване на енергията от ВЕИ, само за нуждите на уличното осветление на съответната община. Ясно е, че слънчевата енергия, генерирана от ФВС, може да се ползва за УО нощно време, само чрез системи за съхранение, респективно батерии. След зареждането на батериите през деня, остава много излишна енергия, особено в обедните часове, която не може да се оползотворява. Т.е. получава следната ситуация, представена съвсем опростено по следния начин – напълваме батерията и след това фотоволтаика спира да работи, вместо да се използва за други потребители в системата на собствените нужди на общината (за сгради, детски градини, кухни, болници, училища и т.н.). Подчертаваме, че става въпрос за използване на излишната енергия за собствени нужди на общината, която много често е в изобилие. Тази излишна енергия за летните месеци май и юни, когато слънчевата радиация е максимална, можем условно да приемем за 100%, като в същото време консумацията на уличната ОУ е 50%. Обратно, за зимните месеци декември и януари, при минимална слънчева радиация, излишната енергия е условно приета за 30%, а консумираната от уличната ОУ енергия е 100%, т.к. нощите тогава са най-дълги. При това положение би следвало ФВС да се проектира съобразно летните изисквания и условия, а избора на батерията да бъде съобразно максималната зимна консумация на уличната ОУ. При това положение би могло да се окаже, че примерно за една община с 5000 осветителя като гр. Шумен, с мощност на LED ОУ от порядъка на 100 kW, да е необходима ФВЦ с мощност от порядъка на 1 MWp и батерии с мощност примерно (1,5÷2) MW. Това предполага, особено през летните месеци, големи количества излишна енергия, която общината не може да усвои за задоволяване на собствените си нужди. По този начин, рязко се намалява електроенергийната ефективност и съществува риск да не се постигнат тези 30% редуциране на първичната енергия. И дори да не се случи това, възниква ситуация, която може да се класифицира като „техническа дискриминация“, т.к. не се разрешава излишната енергия да се използва за собствени нужди, т.е. това е един типичен дискриминационен процес. Извода е, че съществува голямо недоразумение от правно-юридически характер и то трябва спешно да се оправи.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА

1. Направен е анализ на съвременните изисквания при практическо проектиране на ФВС. При синтезиране на схемотехническата постановка и избора на елементната база е формулирана прогресивна стратегия за използване и прилагане на актуална и пълна информация за различните технологии и характеристики, както за компонентите на PV инсталацията, така и за климатичните, радиационните и др. външни фактори. Утвърждаването на

този ефективен подход гарантира постигане на висока електроенергийна ефективност в експлоатационни условия.

2. Представена е пълна категоризация и са формулирани изисквания към PV инверторите. Анализирани са съвременните тенденции за прилагане на иновативни технологии при използване на SMART инвертори и е оценена тяхната ефективност. Анализирана е съвместимостта между инверторите и фотоволтаичните групи и са дефинирани оптимални мощностни съотношения. Формулирани са техническите характеристики и ефективността на инверторите в зависимост от работния им режим.
3. Анализирани са експлоатационните характеристики на различните видове акумулаторни батерии и са представени специфични техни особености. Направен е сравнителен анализ по отношение на приложимост, живот на батерията, ефективност и монтажни особености на разгледаните типове батерии. Формулирани са препоръки за избор на подходяща батерия, като се отчитат температурните режими и условията за безопасност.
4. Разработен е критичен експертен анализ за технико-икономическите проблеми при изграждане и експлоатация на ФВС в световен и национален аспект. Представена е оценка на инвестициите и времето за изграждане на различни генериращи източници и е установено предимството на PV системите за тези два показателя, както и минималния финансов риск при тяхното изграждане. Остро се критикуват европейски политически лидери по отношение на позициите им към развитието на слънчевата енергетика на стария континент. Аналогичен критичен подход е изработен към българските институции във връзка с ниската използваемост на ВЕИ в страната, както и за някои юридически несъответствия в тази връзка.

ВТОРА ГЛАВА - ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА РАЗЛИЧНИ ПОСТАНОВКИ ЗА ОЦЕНКА НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ФЕЦ

В тази глава подробно са разгледани въпросите, свързани с отдаване на максимална мощност от PV системите при нормални условия и частично засенчване, състоянието на PV генерацията в света, гъвкавите методи за повишаване на ефективността и същността на общностите за ВЕИ.

Икономически подход за комплексна оценка на ползите при експлоатация на PV системи

Икономически прогнози, разходи и вреди причинявани от различни енергийни източници

В съответствие с SEERMAP - *Пътна карта за електроенергийния сектор на Югоизточна Европа*, последната ще трябва да замени повече от 30% от сегашния си капацитет за производство на електричество от изкопаеми горива до 2030 г. и повече от 95% до 2050 г., според дългосрочната енергийна политика на Европейския съюз ще задоволява 83-86% от нуждите си от електроенергия чрез водни и вятърни електроцентрали и слънчева енергия. Прогнозира се през 2050 г. 10 пъти увеличение на инсталираните соларни мощности и над 7-кратно увеличение на генерираната от слънце електроенергия и инвестиционните разходи за периода от 1015 €/kWp ще намалееят под 600 €/kWp [114,143].

Според *Пътна карта за развитието на българската електроенергетика до 2050г.*, през 2050г. над 50% от електроенергията в България ще се произвежда от възобновяеми енергийни източници. Тогава се очаква емисиите на CO₂ у нас да намалееят многократно.

При прогнозните цени на ел.енергията от ФВИ в страните от Западна Европа до 2050г. при сравняване на климатичните условия, очакваната цена на ел.енергията от ФВИ у нас ще намалява относително в следната тенденция (табл. 2.1):

Табл.2.1 Прогнозни цени на ел.енергия от ФВС

Година	2015	2020	2030	2040	2050
Цена,лв/MWh	138,6	127,4	105	86,6	72,0

Дори условно таблицата дава представа за тенденцията на цените на електроенергията, генерирана от ФВИ.

Management Lab. прогнозира, че поне до 2037г. не е необходима нова ядрена централа у нас.

Има различни прогнози за развитието на електроенергетиката до 2050г., и всички очакват увеличаване на произвежданата от фотоволтаици ел.енергия. Новата прогноза на Европейската комисия и IRENA потвърждава увеличване на енергията от възобновяеми енергийни източници с *Пътна карта на ЕС* в тази политика [5,40]. Разходите за различни видове източници са анализирани по-долу [36,46,150].

- **Разходи за ВЕИ**

Разходите за ВЕИ се очаква да намаляват в бъдеще, както е ставало в миналото. Обемите на производство на тези нови технологии са все още относително ниски и много от тях включат многобройни производствени стъпки, изискващи скъпа работна ръка. Важен параметър за бъдеща оценка на разходите е т.нар. *коэффициент на прогреса (progress ratio PR)*. Този параметър изразява

отношението, с което разходът намалява всеки път, когато общата въведена в експлоатация мощност се удвои. Например при $PR = 90\%$ има 10% намаление на разходите за всяко двойно увеличение на изградената мощност от обществото. PR за вятърните ЕЦ в зависимост от региона през 80-те и 90-те е бил между 0,8 и 0,96.

Общата (или световната) инсталирана мощност *се е увеличавала двойно приблизително всеки 2,5 години през изминалите 10 години*. При един среден коефициент на нарастване от порядъка на 0,92 намалението на разходите е почти 30% за десетилетие. По-нататъшно намаление на разходите може да се очаква с нарастване на мощността на ВЕИ [148,151,163].

Фотоелектричните системи също са постигнали значителни намаления на разходите през последните няколко десетилетия. За водещите в това отношение страни в света PR е достигнал около 0,8. Глобално инсталираната PV мощност се удвоява приблизително на всеки 3 години. Резултатното намаление на разходите е около 50% за десетилетие. Възможно е по-нататъшно значително намаление поради използването на новите материали за соларни клетки и бързо нарастващите обеми на тяхното производство. Повечето други ВЕИ също показват PR между 0,8 и 0,9. Ако бъдещото PR остане от същия порядък като през последните десетилетия, ВЕИ със сигурност ще станат конкурентни на всички конвенционални източници още през 21 век. Освен намаляването на разходите на ВЕИ, увеличаването на цените на горивата за конвенционалните системи, дължащо се на ограничените конвенционални енергийни ресурси, ще наложат това развитие в дългосрочен план [108,113,147].

ВЕИ системите ще започнат да доминират глобалния енергиен баланс, когато им се даде висок приоритет при неутрализиране на отрицателните последици за обществото и природата от използването на конвенционалните енергийни източници.

• **Разходи за конвенционални източници**

Конвенционалните енергийни системи често са сравнявани икономически с ВЕИ системите, като външните разходи често са изключени от това сравнение. Изравнената стойност на електроенергията (LEC), без да се отчитат външните разходи за генериране на електроенергията, от голяма ЕЦ са от порядъка 0,03 - 0,07 €/kWh_{el} за ТЕЦ на въглища и между 0,03 и 0,04 €/kWh_{el} за газова и парогазова (с комбиниран цикъл) ЕЦ.

Цените за конвенционалните енергоносители (energy carriers) ще нарастват дългосрочно поради тяхната ограниченост. Високите цени на петрола, както цените през 80-те, вече са факт и може уверено да се предполага, че ще нарастват в близко бъдеще. При такива условия относително скъпите днес ВЕИ ще стават все по-конкурентни [34,36].

• **Външни разходи**

Разходите за генерацията на топлинна и/или на електрическа енергия в конвенционалните електрически централи на органично или ядрено гориво се изчисляват аналогично на описаните по-горе. В допълнение, инвестиционните разходи за съответната електрическа централа, разходите за горива, производствените разходи и тези за поддържане са допълнителни разходи, които могат да бъдат само частично покрити или непокрити от тези, които експлоатират централата.

Външните разходи включват освен правителствени субсидии и бюджетни финансови средства за перспективни и др. проучвания, предимно средства за обезщетяване на екологични и здравословни вреди, причинени от електрическата централа. В цените на електрическата и топлинната енергия обикновено не са включени тези външни разходи. Това изкривява икономическото съпоставяне между възобновяемите и конвенционалните енергийни източници, тъй като външните разходи за ВЕИ обикновено са много по-малки.

Впрочем, трябва да се има предвид, че точното оценяване на всички външни разходи е трудно и твърде дискуссионно поради невинаги явното приемане на много предварителни допускания, налагани от стопански и политически фактори.

• **Субсидии в пазара на енергия**

Забелязва се определено неразбиране на това какво е *енергийна субсидия*. Най-често и в най-тесен смисъл този термин се разбира като *директно плащане на средства от правителството на енергиен производител или консуматор*. Всъщност това е само една от възможностите за стимулиране на производството или на използването на определен вид гориво или форма на енергия. Международната енергийна агенция (International Energy Agency - IEA) определя енергийни субсидии за правителствени действия, засягащи предимно енергийния сектор, с които се намаляват разходите за производство на енергия и съответно - цената, плащана от потребителите ѝ или се увеличава печалбата, получавана от производителите на енергия.

Практически всички енергийни субсидии са оправдани, когато се цели:

- *да се защити работната ръка в конкретна местна индустрия или сектор от международната конкуренция или да се подкрепи създаването на работни места;*
- *да се стимулира развитието на регион или селскостопанска област;*
- *да се намали зависимостта от внос за повишаване на енергийна сигурност;*
- *да се намалят действителните разходи от и/или да се осигури достъп до модерни енергийни услуги за определени социални групи или селски общности като средство за подкрепа на благосъстоянието им;*

- да се защити околната среда.

Малко са по-обхватните изследвания за количествено определяне на субсидиите в света като цяло поради недостиг на данни. Най-авторитетно глобално изследване, проведено от Световната банка през 1992г., определя субсидиите само за консумацията на изкопаеми горива, чиито цени са по-ниски, на около 230 000 US долара за година. Отражението на премахване на субсидиите за енергийната консумация върху околната среда би било огромно. То би намалило енергийната консумация с 3,5 % и емисиите на въглероден диоксид - с 4,5%. Много големи субсидии има в Русия, Китай и Индия. В Иран средният процент на субсидиите за пазарната цена е 80%. Не само в развиващите се страни се реализират най-големите субсидии, но и във високоиндустриализирани страни като Германия субсидиите за енергийната консумация също са значителни. Такива например са субсидиите за въглищните минни индустрии в Германия. До 2010 г. общите субсидии в този сектор ще са повече от 80 милиона €. Тази сума би била достатъчна да се изградят около 70 000 MW вятърни мощности, които биха могли да генерират около 1/3 от потреблението на електричество в Германия.

През последните години субсидиите за технологиите за овладяване на възобновяеми енергии са нараснали. Въпреки това те са далеч по-малки в сравнение с огромните субсидии, давани за секторите на изкопаеми горива и на ядрена енергия. Високите субсидии за конвенционални източници на енергия сериозно възпрепятстват защитата на климата и пазара за въвеждане на ВЕИ [129,141,159].

• **Разходи за изследване и развитие**

В много индустриализирани страни повечето разходи/разходи по енергийни изследвания и развитие (R&D) през последните няколко десетилетия са похарчени за ядрената енергия. Дори днес най-високи бюджети са заделени за развитие на технологиите за овладяване на ядрената енергия както на основата на ядрения синтез, така и на ядрения разпад (fusion and fission). По-голямата част от разходите за изследвания и развитие в последните няколко десетилетия са за ядрена енергия. Дори днес почти половината от тези бюджети са разпределени за ядрена енергия. Преди средата на 70-те години почти не е имало бюджетни средства за ВЕИ. След петролните кризи и ядрена авария в Чернобил бюджетните средства за ВЕИ са нараснали, обаче те са все още доста ниски в сравнение с тези за ядрена енергия от края на 90-те години. Тази различна изследователска политика причинява изкривяване на конкуренцията главно в полза на ядрените мощности. Ако техните огромни бюджети за изследвания и развитие бяха използвани за ВЕИ, последните днес биха били конкурентоспособни на световния енергиен пазар без други субсидии [111,164,172].

- **Разходи от вреди върху околната среда и здравето и други външни разходи**

Оценката на загубите от вреди върху околната среда и/или върху общественото здраве е доста противоречива и следователно - твърде трудна. Вредите в резултат на вероятен инцидент в ядрена централа в Централна Европа биха били за около 5 000 милиарда евро. Те са много повече от това, което една национална икономика може да издържи. В Германия законовата застрахователна отговорност за ядрен реактор е само 500 милиона евро. Останалите разходи ще трябва да бъдат понесени от обществото. Неограничено застрахователно покритие в повечето случаи би направило ядрените централи губещи.

Теоретичен подход за оценка на електроенергийната ефективност

Проектите за изграждане на ВЕИ се реализират с помощта на банкови заеми, като срока за погасяване на заема и неговия лихвен процент зависят в голяма степен от мащаба на проекта и фактори, свързани с рисковете на инвестицията. Тъй като подобни проекти се изграждат за продължителен период, при реализацията им е необходимо да се минимизира влиянието на фактора време като бъдещата стойност на парите се трансформира към сегашно време. Върху този процес на трансформация влияние оказват различни условия, като например обезценяване на паричните средства, устойчивостта на пазара, стабилността на инвестиционния процес, инфлацията и др. В ЕС е възприет целесъобразен подход за отчитане на влиянието на „фактора време“ върху номиналната стойност на паричните средства, като е въведен т. н. метод на „дисконтиране на финансовите процеси“. Той дава възможност за адекватна прогнозна оценка на това каква ще е бъдещата стойност на паричните средства, отнесени към настоящия момент [20,26,27].

Предложени са следните методи за определяне на икономическите параметри при изграждане на ФВС, при които се използва принципа на дисконтирането [12,43].

- **Метод на нетната настояща стойност (Net Present Value – NPV)**

Приложението на метода за ФВС предоставя възможност за определяне на печалбата от генерираната ЕЕ за всяка година от експлоатацията на съоръжението. При определянето на NPV се разглеждат два варианта: $NPV > 0$ (инвестицията е целесъобразна, проектът е печеливш); $NPV < 0$ (проектът води до загуби и не се препоръчва да се изгражда).

- **Методи с вътрешна норма на възвръщаемост (Internal rate of return - IRR)**

Чрез IRR се определя зависимостта между стойността на заема и лихвите по кредита. Ако изчислената стойност на IRR е по-голяма от лихвата, то реализацията на проекта води до печалба. В противен случай проектът е на загуба.

Вероятностно статистически подход за изследване на енергетични процеси многофакторно пространство

За изследване влиянието на факторите A, B, C и т.н. върху електроенергийната ефективност, разгледана като изходен параметър (ИП) или параметър на оптимизация y , се използва дисперсионния анализ. Той е особено ефективен метод за изучаване влиянието на няколко фактора, върху ИП y , като използва всички наблюдения за едновременна оценка на въздействието на факторите и техните взаимодействия върху математическото очакване на изследваното случайно явление. Следователно, задачата на многофакторния дисперсионен анализ е да се установи дали факторите A, B, C и т.н. всеки поотделно и всяко тяхно съчетание, оказва влияние на математическото очакване на ИП y , разгледан като с.в. [9,28]. При многофакторния дисперсионен анализ се използва едновременното влияние на всички m фактора $A, B, C \dots$ върху ИП y . Всеки фактор или определен брой k (k_A, k_B, k_C) ниво, като нивото на даден фактор, например A , може да бъде комбинация от няколко фактора, отнесени към елементи на фактора A . Всяко наблюдение се означава с индекси, чийто брой е с 1 по-голям от броя на факторите. Например при два фактора A и B , броя на индексите е 3, като ИП се записва $y_{il\dots j}$, където с i се означава номерът на нивото A_i на фактора A , а с l -номерът на нивото B_l на фактора B и т.н., а с j -номерът на паралелното наблюдение. При многофакторното изследване наблюденията върху ИП при всички възможни комбинации се означават $y_{ABC\dots}$. Обикновено се приема, че броя на паралелните наблюдения j при всяка комбинация от нива и фактори е постоянна величина $n = \text{const}$. Тогава общия брой наблюдения N се определя от израза:

$$N = n \cdot k_A \cdot k_B \cdot k_C \cdot \dots k_m \quad (2.5)$$

Дисперсионен анализ на два фактора

Данните на наблюденията при два фактора A и B , с нива съответно $k_A = k$ за фактор A и $k_B = q$ за фактор B и брой на паралелните наблюдения n , схематично се представя в таб.2.3. Във всяка (il) клетка от тази таблица са нанесени данните от паралелните наблюдения, а предпоследната в дясно клетка е поместена средната стойност \bar{y}_{il} , определена от формулата:

$$\bar{y}_{il} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ilj} \quad (2.6)$$

Основно уравнение на дисперсионния анализ при два фактора.

Основното уравнение на дисперсионния анализ при два фактора А и В с отчитане на взаимодействието, има следния вид:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_{AB} + Q_R \quad (2.9)$$

Общата сума на квадратите Q има вида:

$$Q = \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^q \sum_{j=1}^n (y_{ilq} - \bar{y})^2 \quad (2.10)$$

Тя представлява сума на квадратите на отклоненията на всички наблюдения y_{ilq} от тяхната средна стойност \bar{y} . Сумата Q_A представлява сумата от квадратите на отклоненията на средните стойности по групите \bar{y}_i от общата средна стойност \bar{y} и се нарича сума от квадратите между групите на фактор А. Q_A се определя от израза:

$$Q_A = n \cdot q \cdot \sum_{i=1}^k (\bar{y}_{i0} - \bar{y})^2 \quad (2.11)$$

Сумата Q_B представлява сума от квадратите на отклоненията на средните стойности по групите \bar{y}_l от общата средна стойност \bar{y} и се нарича сума от квадратите между групите на фактор В. Q_B се определя от израза:

$$Q_B = n \cdot k \cdot \sum_{l=1}^q (\bar{y}_{0l} - \bar{y})^2 \quad (2.12)$$

Сумата Q_{AB} представлява сума на квадратите между групите на взаимодействието АВ и се определя от израза:

$$Q_{AB} = n \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^q (\bar{y}_{il} - \bar{y}_{i0} - \bar{y}_{0l} + \bar{y})^2 \quad (2.13)$$

Сумата Q_R представлява сума от квадратите на отклоненията на всяко наблюдение y_{ilj} от средната стойност \bar{y}_{il} и се определя от израза:

$$Q_R = \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^q \sum_{j=1}^n (y_{ilj} - \bar{y}_{il})^2 \quad (2.14)$$

Q_R характеризира остатъчното разсейване на случайната величина y , породено от действието на случайната грешка и затова се нарича още „остатъчна сума на квадратите“.

Определяне степените на свобода

Степените на свобода са пряко свързани с обема на наблюдението. По аналогия на (2.12), за степените на свобода v на Q се записва [198]:

$$v = v_A + v_B + v_{AB} + v_R = N-1 = n \cdot k \cdot q - 1 \quad (2.15)$$

Степените на свобода на останалите суми Q_A, Q_B, Q_{AB}, Q_R са съответно:

$$v_A = k - 1; \quad v_B = q - 1; \quad v_{AB} = (k - 1)(q - 1); \quad v_R = k \cdot q (n - 1) \quad (2.16)$$

Дисперсионният анализ е един от най-разпространените методи в математическата статистика, който се използва за установяване на важни съотношения между взаимосвързани случайни величини. На ред с установяването и оценяването на съотношенията между случайните величини, метода съдържа като основен елемент възможността за вземането на решения и обосноваването на съответните статистически изводи. По-горе бяха представени в синтезиран вид теоретичните основи на метода, който по-късно се използва в изследователски процес и съставяне на процедури, насочени за вземане на статистически решения и изводи.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ВТОРА ГЛАВА

1. Анализирани са постановки, свързани с отдаване на максимална мощност от PV системи и са маркирани основните фактори, влияещи върху МРРТ. Изследвани са множество методи за определяне оптималните работни точки и са представени основните характеристики на инверторите, работещи с различни алгоритми. Набелязани и утвърдени са основните компоненти и условия за оптимална работа на всяка ФВС.

2. Представени са оптимални решение по критерий “Максимум на електроенергийната ефективност” при частично засенчване. Направен е сравнителен анализ на 5 метода за постигане на максимална ефективност при частично засенчване при съпоставяне на различни характеристики и показатели. Този подход дава възможност за оценка на преобладаващото мнозинство от варианти, срещани при реални експлоатационни условия.

3. Направен е анализ на резултатите за електроенергийна ефективност на ФВС, като са представени комплексни показатели за състоянието на генерацията в световен аспект през последните години. Анализирани са “гъвкави” методи за повишаване на ефективността на ФВС и е доказан прогресивния характер на “общностите за възобновяема енергия”. Дефинирана е основната цел за тези постановки, които са насочени не само към осигуряване на икономически и

финансови изгоди, но основно се фокусират за постигане на екологични и социални ползи.

4. Разработена е рационална постановка и икономически подход за комплексна оценка на ползите при експлоатация на PV системи. Представени са икономически прогнози, разходите и вредите, причинявани от различни енергетични източници са систематизирани и сравнени. Формулираният метод за оценка на електроенергийната ефективност се характеризира с висока степен на значимост и представлява иновативен подход, ефективно приложим за изследване на ФВС.

5. Разработена е математическа формализация на многофакторен експеримент за оптимизиране на електроенергийната ефективност. Метода се базира на основните принципи на дисперсионния анализ при два фактора, като е представено основното уравнение с отчитане на ефектите на взаимодействие на факторите и са изведени изрази за определяне на съставящите на основното уравнение. Ефективността на предложения метод се изразява в установяване и оценяване на съотношенията между случайните величини при вероятностен изследователски процес, а също така и във възможността за вземане на решения и обосноваване на съответните статистически изводи.

ТРЕТА ГЛАВА - ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЕХНИКО-ИКОНОМИЧЕСКИТЕ ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПОСТИГАНЕ НА ВИСОКА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ФВС

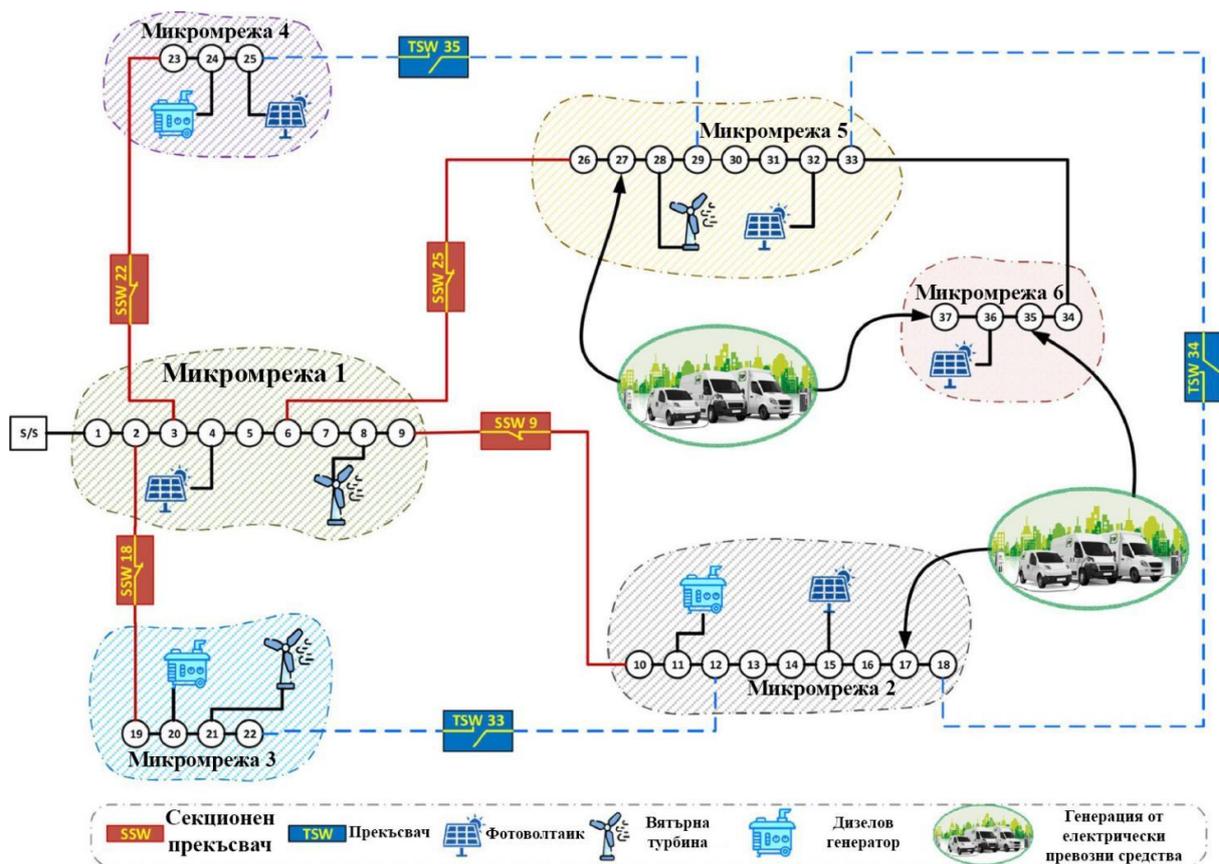
Развитие на пазарните механизми и мениджмънта при PV системите

В последните години се наблюдава ускорено развитие на пазарните механизми, мениджмънта и маркетинга в областта на PV системите и инсталациите за съхранение на генерираната енергия. Правителствата на различните страни разработват адекватни икономически програми за постигане на планирания напредък. Съвета на ЕС прие нов регламент със засилени правила за устойчивост на всички видове батерии и регулирането на целия им жизнен цикъл. Той установява цели за събиране на отпадъци от батерии или преносими батерии (63% до края на 2027г. и 73% до края на 2030г.) и въвежда събиране, специфично за отпадъците от батерии от леки транспортни средства (51% до края на 2028г. и 61% до края на 2031г.). Регламентът определя мероприятия за възстановяване на литий от отпадъчни клетки и батерии на 50% до края на 2027г. и 80% до края на 2031г. За батериите за промишлени, автомобилни и електрически превозни средства се очакват задължителни минимални нива на рециклирано съдържание от 16% за кобалт, 85% за олово, 6% за литий и 6% за никел. Клетките и батериите трябва да бъдат придружени от документация за рециклираното съдържание. Целта за ефективност на рециклиране е определена

на 80% за никел-кадмиеви клетки или батерии до края на 2025г. и 50% за други отпадъчни субстанции за клетки или батерии до края на 2025г. [182,183,187].

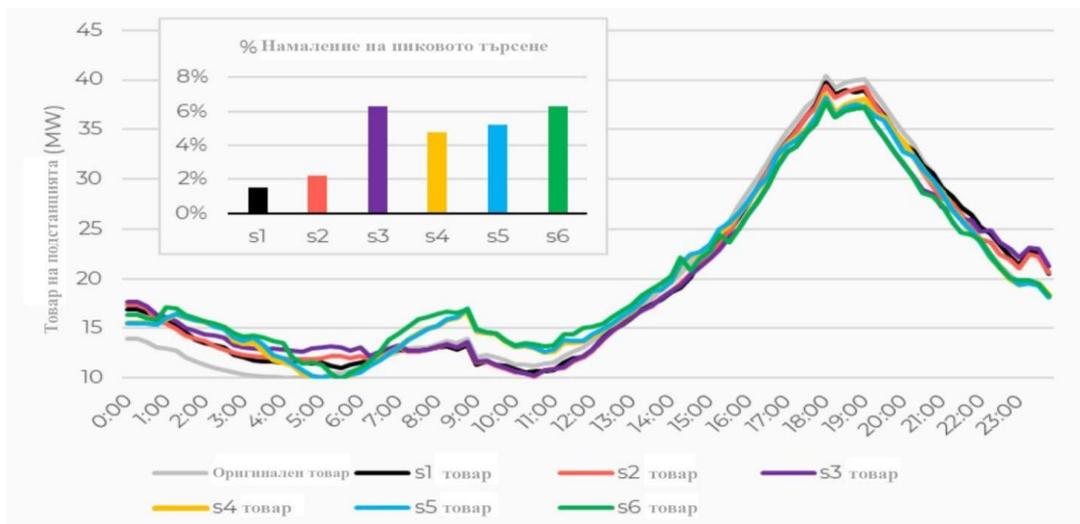
Изследване възможностите на „гъвките“ технологии за повишаване на ефективността на ФВС чрез балансиране на ЕЕС

Гъвките технологии (параграф 2.4.3.) представят добри възможности за повишаване ефективността на ФВС. Електрическите автомобили се очертават като най-перспективния вариант в това отношение, тъй като те могат да работят както в режим на консумация, така и в режим на генерация.



Фиг.3.1. Предложената в [62] мулти-микрогريد система

Аналогични изследвания в Австралия показват, че използването на средства за комуникация между електрически превозни средства и електрическите мрежи (системата V2G) с 10% проникване може да намали цената за пиково потребление на ел.енергия за местните подстанции с 6% и значително да намали разходите за зареждане на собствениците на електрически автомобили [55].



Фиг.3.2. Зависимост по система V2G за 6 март 2023г

Анализ на резултати от експериментални изследвания върху електроенергийната ефективност чрез метода „полза-разход“

Обща характеристика на изследваните обекти

Проведени са изследвания в 14 PV системи с мощност в границите от 100 kW_p до 18 MW_p , в които измерването на отдадената ел. енергия се осъществява на страна 20 kV и 110 kV . Трансформирането на произведената енергия става с помощта на повишаващи СТ с мощност от 160 kVA до 2500 kVA , инсталирани в КТП с различен брой СТ. PV модулите са групирани в стрингове, които са свързани със стрингов инвертор. Някои от ФВС са изградени и със смесено (последователно-паралелно) свързване на модулите, групирани към централен инвертор при по-високо работно напрежение. В тези случаи стринговете най-често са с еднакви мощности, съставени от модули с еднакви електрически характеристики. В случаите, когато стринговете имат различни мощности и инверторът има един вход, то определя MPP на цялата група и не може да направи разлика в състоянието на отделните стрингове, които имат различни MPP. Тогава ефективността е по-ниска в сравнение с варианта при много стрингов инвертор. Причина за различната ефективност на стринговете най-често е частичното засенчване и замърсяването на PV панелите. Свързването на модулите в стрингове и от там към стринговия инвертор, във всички проекти се осъществява с открито положени DC кабели с различни сечения, устойчиви на високи и ниски температури и на UV излъчване. Клемните кутии на всеки модул са водо, температурно и UV и в тях са монтирани блокинг диоди за предпазване от обратни токове и к. с. Всички централни инвертори са за външен монтаж, със степен на защита на електронните компоненти IP65, а на кабелните входове IP54. Стринговите инвертори са монтирани на металната ферма, към която са закрепени PV модулите, в близост до съответните стрингове. Освен силовите DC и AC

кабели се полагат и информационни кабели за мониторинг като последователно се свързват всички инвертори за последния. Във всички изследвани PV инсталации са инсталирани информационни системи, с които се осъществява събиране и архивиране на данни, диагностика и управление на енергийните процеси. Телекомуникационния канал най-често е реализиран с интерфейс стандарта RS 485, галванично развързан във всяко устройство, присъединено към магистралата.

В някои от по-мощните PV централи за мониторинг, регулиране и управление на енергетичните процеси се използва SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Системата регистрира и анализира различни данни и издава команди за предотвратяване на нежелани събития или оптимизиране на някои параметри и режими на работа чрез преминаване в диалогов режим с оператора. При настъпване на аварийни ситуации и неизправности, SCADA анализира степента на повредата и генерира сигнали за авария, като информацията се визуализира, определя се нейното приоритетно ниво и автоматично се изработва оперативно решение. Мониторинговата система е изградена с опростен, лесен и удобен за манипулиране графичен дисплей, а свързаната система работи с високо ефективен и технологичен софтуер, използващ изкуствен интелект, невронни мрежи и размита логика. По този начин при тези ФВЦ се постига диспечерско управление на енергетичните процеси с висока степен на автоматизация и оптимизация, повишава се надеждността, безопасността и ефективността на ФВС и се намалява нейната себестойност.

Теоретични основи на изследователския процес

Основен компонент на електроенергийна ефективност са загубите на мощност и ел. енергия в ЕЕС. Това се отнася в пълна степен и за ФВС. Загубите на мощност може да се дефинират в интегрален и диференциран вид като се приложи методиката на Р. Дрехслер [1,18,21]. Парциалното представяне на активните загуби е с помощта на изразите:

$$\left. \begin{aligned} \text{парциална част на загубите от реактивна мощност } \Delta P_Q &= \frac{Q^2}{P^2} \cdot 100[\%] \\ \text{парциална част на загубите от пулсираща мощност } \Delta P_N &= \frac{N^2}{P^2} \cdot 100[\%] \\ \text{парциална част на загубите от скрита мощност } \Delta P_{S_0} &= \frac{S_0^2}{P^2} \cdot 100[\%] \\ \text{парциална част на загубите от деформ. мощност } \Delta P_D &= \frac{D^2}{P^2} \cdot 100[\%] \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

където: P, Q, N, S₀ и D - са съответно активна, реактивна, пулсираща, скрита и деформационна мощности.

Пълната мощност S се определя с помощта на израза:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + (3n + 1)S_0^2 + D^2} \quad (3.2)$$

където: n – коефициент, показващ колко пъти съпротивлението на неутралния проводник е по-голямо от съпротивлението на фазните проводници.

Степента на несиметрия на трифазна система се характеризира с коефициента на несиметрия по напрежение и ток ε_U и ε_I и коефициентите на неуравновесеност по напрежение и ток α_U и α_I [32]. Отделните мощности от израза 3.1 се определят по следния начин:

- **активна мощност P** - реалната част на мощността S (пълна мощност при симетричните трифазни системи със синусоидални токове:

$$P = R_e[S] = S \cdot \cos\varphi; \quad S = \sqrt{R^2 + Q^2} \quad (3.4)$$

- **реактивна мощност Q** - имагинерна част на мощността S :

$$Q = I_m[S] = S \cdot \sin\varphi; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.5)$$

- **пулсираща мощност N** - възниква при предаване на активна мощност P в несиметрично натоварена трифазна система. В конкретния случай N се определя чрез коефициента на несиметрия по ток ε_I по следния начин:

$$N = \varepsilon_I \cdot S = \varepsilon_I \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.6)$$

$\varepsilon_I = I_2/I_1$ (I_1 и I_2 – съставлящи на тока с права и обратна последователност)

- **скрита мощност S_0** - възниква при предаване на активна мощност P в неуравновесена трифазна четирипроводна система, характеризираща се с коеф. на неуровновесеност по ток α_I :

$$S_0 = \alpha_I \cdot S = \alpha_I \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.7)$$

$\alpha_I = I_0/I_1$ (I_0 и I_2 – съставлящи на тока с нулева и права последователност)

- **Деформационна мощност D** - възниква при предаване на активна мощност P при несинусоидално токово натоварване. В конкретния случай D се определя по следния начин:

$$D = k_{II} \cdot S = k_{II} \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + (3n + 1)S_0^2 + D^2} \quad (3.8)$$

където: k_{II} – трифазен коефициент на деформация на токовете, определен от израза:

$$k_{II} = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} I_{A_v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{B_v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{C_v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{N_v}^2}{I_{A_1}^2 + I_{B_1}^2 + I_{C_1}^2 + I_{N_1}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{A_v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{B_v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{C_v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{N_v}^2}} \quad (3.9)$$

В (3.9) $I_{A_1}^2, I_{B_1}^2, I_{C_1}^2$ и $I_{N_1}^2$ са токовете на основния хармоник за трите фази и неутралата, а $I_{A_v}, I_{B_v}, I_{C_v}$ и I_{N_v} са висшите хармоници от $v = 2$ до ∞ за токовете на трите фази и неутралата.

Деформационната мощност D зависи от хармониците на тока и се представя във вида:

$$D = \sqrt{3}U \cdot \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} I_{A_v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{B_v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{C_v}^2 + n \cdot \sum_{v=2}^{\infty} I_{N_v}^2} \quad (3.10)$$

където: U – фазно напрежение в трифазната четири проводна нелинейна система.

Фактора на мощността PF се определя от израза [21]:

$$PF = \frac{P}{S_d} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + (3n+1)S_0^2 + D^2}} \quad (3.11)$$

Пълните загуби на активна мощност ΔP в система с несиметрични и несинусоидални токове, се определят от израза [21]:

$$\Delta P \approx \frac{1}{PF} = \frac{1}{P^2} \cdot [P^2 + Q^2 + N^2 + (3n + 1) \cdot S_0^2 + D^2] \quad (3.15)$$

При напълно симетричен и синусоидален режим и без предаване на реактивна мощност, т.е. когато $Q=0$; $\cos\varphi = 1$; $N = 0$; $\varepsilon_I = 0$; $S_0 = 0$; $\alpha_I = 0$; $D = 0$; $k_H = 0$, загубите на мощност са минимални.

Отделните парциални части за загубите могат да се представят и чрез коефициентите ε , ε_I^2 , α_I , k_H , $\text{tg}\varphi$ с помощта на изразите:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_Q &= \text{tg}\varphi^2 \cdot 100[\%]; \quad \Delta P_N = \frac{\varepsilon_I^2}{\cos\varphi^2} \cdot 100[\%] \\ \Delta P_{S_0} &= \frac{(3n + 1) \cdot \alpha_I^2}{\cos\varphi^2} \cdot 100[\%] \\ \Delta P_D &= \frac{1}{\cos\varphi^2} \cdot (1 - \varepsilon_I^2) \cdot \frac{k_H^2}{1 - k_H^2} 100[\%] \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

От представените по-горе формули следва израза:

Определянето на загубите само чрез $\cos\varphi$ може да се използва при напълно симетрична и синусоидална система, което практически не се среща в съвременните ЕЕС. Предложеният от Дрехслер подход дава възможност за точна и бърза оценка за качеството на ЕЕ, като изходната информация в случая се получава от показанията на мрежови анализатори или други цифрови уреди.

Апаратурно измерване на енергетични показатели при провеждане на изследователския процес

Съобразно спецификата и характерните особености на ФВС апаратурното изследване си поставя следните цели:

- *Провеждане на обективни измервания на различни електротехнически параметри в характерни точки на ФВС чрез професионални анализатори,*

с помощта на които да бъдат проведени анализи във връзка с технико-икономическите проблеми на изследването;

- С помощта на представената в параграф 3.3.2 методика и специално разработено софтуерно осигуряване да се определят енергетични характеристики, свързани със загубите на мощност и ел. енергия, респективно с електроенергийната ефективност;
- Въз основа на резултатите от изследването да се формулират технически решения и подходи за подобряване на експлоатацията на ФВС и постигане на по-добър икономически и екологичен ефект.

Апаратните средства, използвани в изследователския процес, имат професионален статут и се характеризират с висока точност и прецизност на измерването.

При многовариантно проектиране методът „полза-разход“ може да се съчетае с метода на „приведените годишни разходи“ Z , като се използва изразът:

$$Z = C + S_a \cdot I_0 \quad (3.22)$$

където: S_a - реален дисконтов лихвен процент

S_a се определя с помощта на изразът [9,190]:

$$S_a = \frac{F_n - b}{1 + b} \quad (3.23)$$

където: F_n - номинален лихвен процент, определен от БНБ; b - коефициент, отчитащ годишната инфлация.

Стойностите на F_n и b , в съответствие с реалната икономическа ситуация в страната са съответно:

$$F_n = 3\% ; b = 6\%$$

В съответствие с (3.23) се определя:

$$S_a = \frac{0,03 + 0,06}{1 + 0,06} \cdot 100 = 8,49\%$$

Оптимизационната задача изисква сравнение минимум на два варианта [215]:

- I. Вариант - конвенционална ФВС с мощност 1MWp, изпълнена с PV модули с к.п.д.=19%, инвертори и всички други необходими съоръжения от среден клас по отношение на качество и технико-икономически показатели. Стойността

на инвестицията е $I_{o1} = 2\,440\,000$ лв., а годишните експлоатационни разходи в дисконтиран вид са $C_1 = 112\,000$ лв.

II. Вариант - ФВС с мощност 1 MWp с PV модули с висока ефективност к.п.д. = 23%, SMART инвертори с широки функционални възможности, система за комуникация и контрол; всички елементи са със повишена надеждност и устойчивост, потвърдено от проектната и приемо-предавателната документация. Стойността на инвестицията е $I_{o2} = 2\,760\,000$ лв., а дисконтираните годишни експлоатационни разходи са $C_2 = 26\,300$ лв.

ПГР за I и II вариант съответно:

$$Z_1 = 0,0849 \cdot 2\,440\,000 + 112\,000 = 319\,156 \text{ лв.}$$

$$Z_2 = 0,0849 \cdot 2\,760\,000 + 26\,300 = 260\,624 \text{ лв.}$$

Следователно, ЕЕЕ ΔZ от прилагането на варианта с по-високотехнологични съоръжения, респективно с по-големи първоначални инвестиции е:

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = 319\,156 - 260\,624 = 51\,532 \text{ лв.}$$

Разликата в сроковете на откупуване между двата варианта се определя от израза:

$$T_0 = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} = 3,733 \text{ г.}$$

Следователно, вторият по-скъп, но на по-високо технологично ниво вариант, ще се откупи с почти четири години по-рано от първия по-евтин вариант. В Табл.3.3 е представен сравнителен анализ на двата варианта [215].

Вариант	Ию	С	З	Тотк = 3,733 [г]
I вариант	$I_{o1} = 2\,440\,000$ лв.	$C_1 = 112\,000$ лв.	$Z_1 = 319\,156$ лв.	
II вариант	$I_{o2} = 2\,760\,000$ лв.	$C_2 = 26\,300$ лв.	$Z_2 = 260\,624$ лв.	
Разлика Δ	$\Delta I_o = 320\,000$ лв.	$\Delta C = 85\,700$ лв.	$\Delta Z = 51\,532$ лв.	

Постоянната дисконтирана годишна икономия се определя с помощта на израза [3,16,17,43]:

$$\Delta C_d = \Delta C (1+S_a)^{-t} \quad (3.24)$$

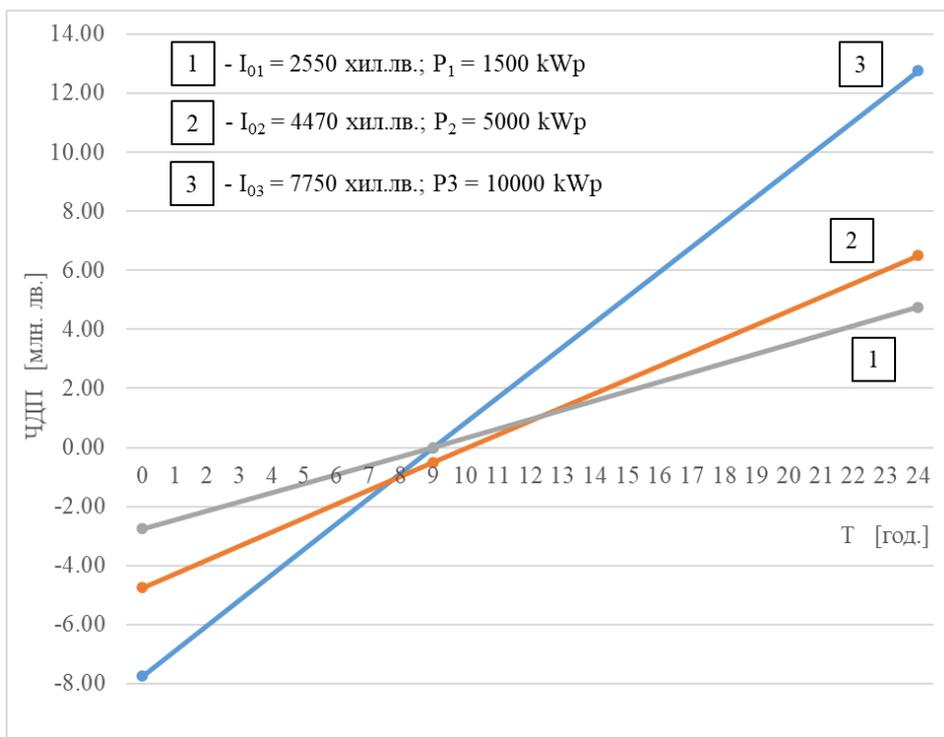
където: ΔC - разлика в експлоатационните разходи на двата варианта;
 t - дискретизация на разглеждания период с продължителност t години.

Чистата дисконтирана печалба (ЧДП) при положение, че годишната икономия на експлоатационни разходи е постоянна величина, се определя от израза:

$$\text{ЧДП} = \Delta C \frac{1-(1+s_a)^{-t}}{s_a} - \Delta I_0 \quad (3.25)$$

В Табл.3.4. са представени стойностите на ΔI_0 , ΔC , ΔC_d и ЧДП за 10 годишен срок на изследване. На фиг. 3.5 е представено изменението на ЧДП за 3 вида ФВС с различни мощности за период от 2024г. Първоначалните инвестиции на изследваните ФВС са съответно $I_{01}=2550$ хил. лв.; $I_{02}=4470$ хил. лв.; $I_{03}=7750$ хил. лв. Мощностите на изследваните ФВС са $P_1=1500$ КВт; $P_2=5000$ КВт; $P_3=10000$ КВт. Срока на откупуване на инвестициите за трите ФЕЦ е в границата от 9 до 11г. [3,39,40]

Период на дисконтиране t [г]	Разлика в капиталовложенията ΔI_0 [лв]	Постоянна икономия на експлоатац. разходи ΔC [лв]	Дисконтирана икономия на експлоатац. Разходи ΔC_d [лв]	Чиста дисконтирана печалба ЧДП [лв]
1	320 000	85 700	78 993	-241 006
2	320 000	85 700	72 812	-168 536
3	320 000	85 700	67 113	-101 081
4	320 000	85 700	61 864	-39 178
5	320 000	85 700	57 020	17 801
6	320 000	85 700	52 558	70 359
7	320 000	85 700	48 445	118 805
8	320 000	85 700	44 654	194 805
9	320 000	85 700	41 159	204 619
10	320 000	85 700	37 938	242 558



Фиг. 3.6 ЧДП за три вида ФЕЦ с различни мощности

Предложеният метод представлява прогресивен подход за изследване на технико-икономическите показатели на PV инсталации. С негова помощ се прогнозира съответствието на сегашната стойност на паричните потоци с бъдещия техен еквивалент.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА

1. Установено е ускорено развитие на пазарните механизми, мениджмънта и маркетинга в областта на PV системите. Голям напредък има в между системните връзки, гъвкавостта на интелигентните мрежи, цифровизацията на външния и вътрешния пазар, растежът на работните места на европейския и световния пазар на PV индустрията, растежът на инвестициите във ФВС (общините отпускат безвъзмездно помощи на частни лица), поредица от търгове с цени по-ниски от 5 евро цента на kWh и много други. Анализът показва, че са постигнати значителни резултати и в нарастване ефективността на PV модулите, рециклирането им, PV транспорта (зарядни станции се строят максимум на 60км отстояние), термopомпите се смятат за ВЕИ, разработване на учебни програми и практикуми за образование и мн. др. У нас ЕСО установи високият размер на допълнителните финансови разходи за ФВС от страна на държавата от порядъка на 1 млрд. лв., което в никакъв случай не омаловажава достойнствата на слънчевата енергия.
2. Доказано е, че гъвкавите технологии, респективно използването на електромобили за балансиране на електропотреблението, може съществено да

намали консумацията по време на върховото натоварване на ЕЕС. Изследването показва, с помощта на технологичния продукт V2G, EV от консуматори може да се трансформират в съоръжения, осигуряващи приходи на собствениците и в същото време чрез достъпа до пазара за енергийни услуги, предоставят възможност за балансиране и оптимизиране на мрежата. Установено е също така, че двупосочното зареждане прави ел. енергията по зелена и по евтина, освен това увеличава живота на батерията. Тенденциите в бъдеще са включването на потенциала на автомобилните батерии за регулиране на честотата и напрежението на ЕЕС, което ще бъде от съществено значение за оптимизиране на електрическите мрежи.

3. Проведено е експериментално изследване върху ЕЕЕ в 14 ФВС с мощност в границите 100KWp до 18MWp. Приложените теоретични и апаратурни подходи в изследването са научно обосновани и се характеризират с всеобхватност и висока ефективност. Апробирането на метода “полза-разход” за икономическа оценка за ефективността на ФВС, представлява иновативна стратегия за прогнозиране на икономическите показатели и със използване на инструментариума на “дисконтирането” се реализират добри възможности за получаване на оптимални решения, потвърдено от проведения изследователски процес.

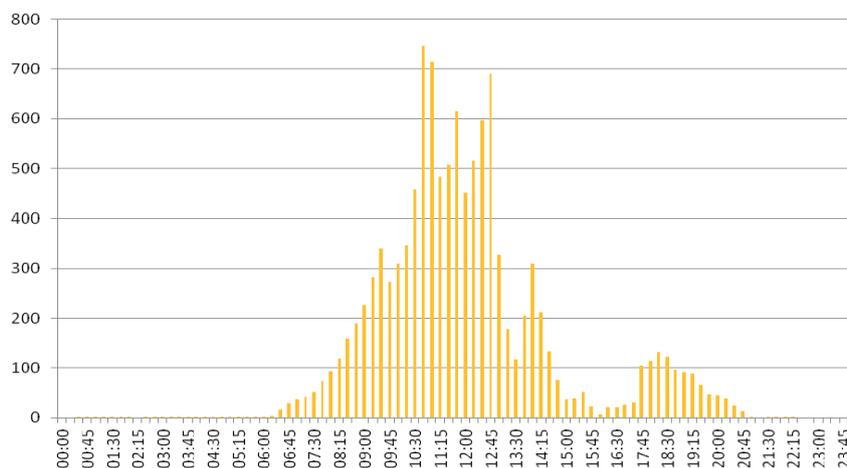
ЧЕТВЪРТА ГЛАВА - ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПРОЦЕСИТЕ ЗА РАЗВИТИЕ, РАЦИОНАЛИЗИРАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ ПО КРИТЕРИЙ “ЕЛЕКТРОНЕРЕГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ”

Прогресивно развитие на PV модулите, инверторите и системите за съхранение в световен аспект

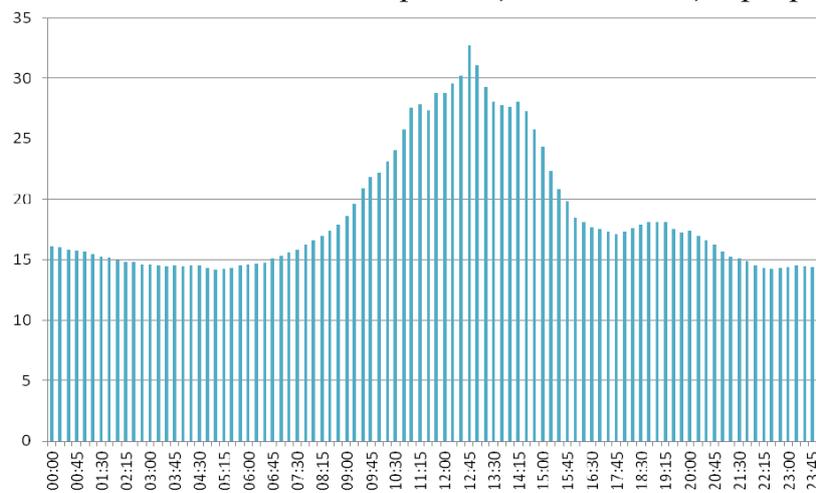
Ефективността на ФВС в най-голяма степен зависи от качеството и характеристиките на PV модулите, инверторите и системите за съхранение на слънчевата енергия. В тази връзка е направено едно кратко проследяване на развитието на тези основни компоненти на PV инсталациите.

Провеждане на практическо изследване

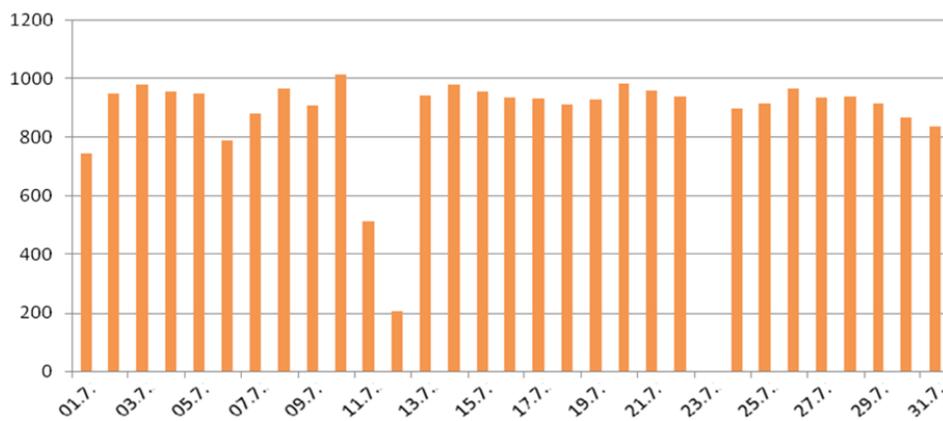
На фиг. 4.4 до фиг. 4.9 са представени измервания за слънчевата радиация и температурата в денонощен, месечен и годишен разрез за ФВЦ с мощност 2 MW, разположена в планински район. В таблица 4.1 са представени резултати за всички изследвани 14 ФВЦ.



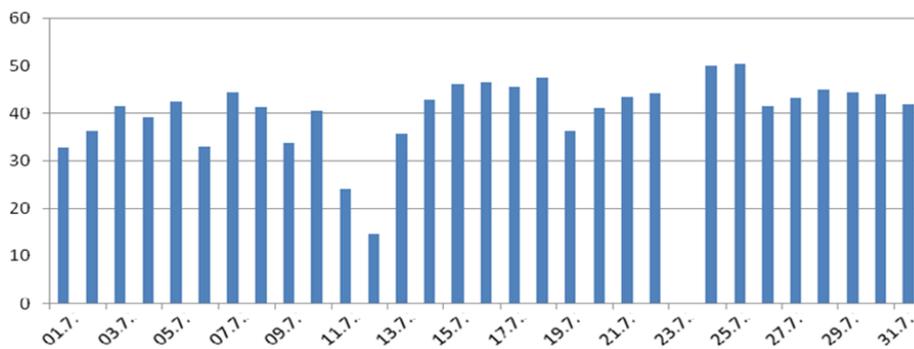
Фиг. 4.4 Изменение на слънчевата радиация в денонощен разрез [W/m^2]



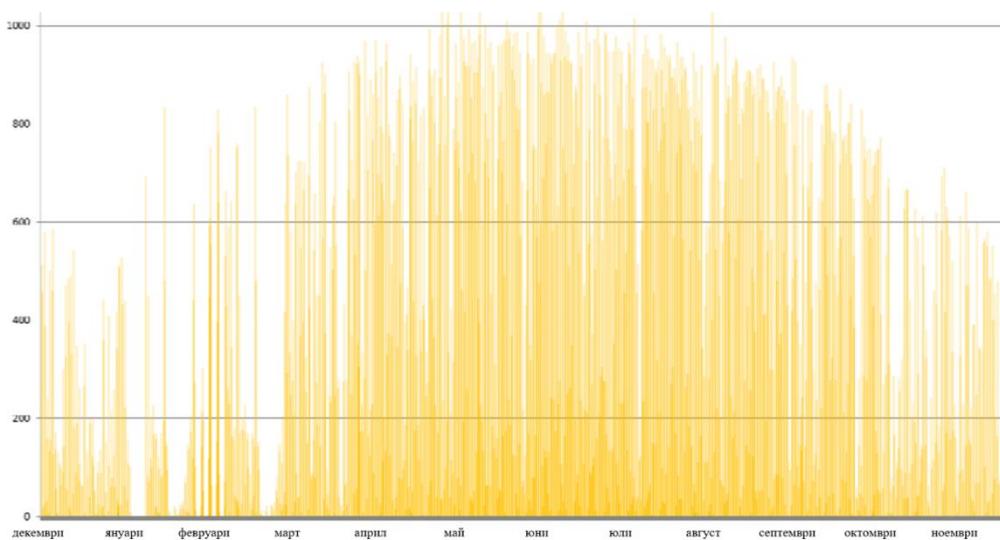
Фиг. 4.5 Изменение на температурата на модулите в денонощен разрез [$^{\circ}C$]



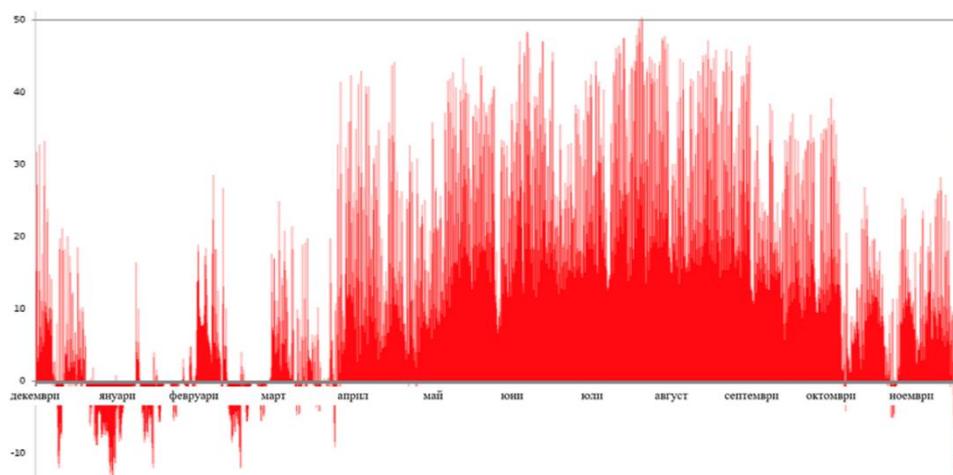
Фиг. 4.6 Динамика на слънчевата радиация за месец Юли [W/m^2]



Фиг. 4.7 Изменение на температурата на PV модулите за месец Юли [°C]



Фиг. 4.8 Изменение на слънчевата радиация върху PV модулите в годишен разрез [W/m^2]



Фиг. 4.9. Изменение на температурата на модулите в годишен разрез [°C]

Тбл. 4.1. Стойности за някои показатели на изследваните обекти

№	Мощност	Напрежение на присъединяване	Максимална годишна слънчева радиация	Максимална към минимална годишна температура
	[MWp]	[kV]	[W/m ²]	[°C]
1	5	20	1138	66/4
2	4	20	1125	65/2
3	10	110	1092	57/3
4	1,25	20	1025	47/4
5	8	110	1065	70/1
6	18,74	110	1120	52/6
7	2	20	1080	50/-9
8	0,120	0,4	1060	52/5
9	0,580	20	980	59/2
10	0,280	0,4	1210	62/2
11	0,195	0,4	1120	58/4
12	2	20	795	68/1
13	1,5	20	1020	59/-3
14	5	20	1045	48/-5

Таблица 4.2. Относителна слънчева радиация по месеци за региона

Месец	Относителен дял %	Месец	Относителен дял %
Януари	3,52	Юли	13,3
Февруари	4,98	Август	12,38
Март	8,45	Септември	9,35
Април	10,46	Октомври	7,72
Май	12,6	Ноември	3,26
Юни	11,8	Декември	2,18

С помощта на тази таблица може да се определи съотношението на генерираната електрическа енергия през по-хладните пролетни месеци и летните горещи месеци и да се оцени електроенергийната ефективност.

Практическо определяне на ЕЕЕ на изследваните ФВС.

Повишаване на ефективността на PV модулите и PV инсталациите е от изключително значение за този най-перспективен ВЕИ източник. Поради това въпросите за енергийната ефективност на ФВС заемат основно място в политиката на ЕС, т. к. инвестициите в този сектор са все още значими по стойност. Съществуват публикации на множество изследователи от различни страни за определяне на ЕЕ на действащи PV обекти с различни мощности и характеристики, интересни за анализ и изследване.

В [29] и [30] е представен метод за определяне КПД на ФВС:

$$\eta = \frac{E}{\int_t G.A.dt} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.2.)$$

където: E – генерирана ЕЕ от PV системата за време t; G – интензитет на слънчевата радиация, паднала върху панелите, W/m²; A – площта на PV панелите, m².

Табл. 4.3. Резултати от изследването на ФВС

Месеци	Генерирана ЕЕ [MWh]	Относителен дял на средно месечна генерация за региона [%]	Температурен диапазон на модулите [°C]	Средно месечна температура за региона [°C]
XII	109,63	2,18	11 ÷ 16	9
I	135,18	3,52	15 ÷ 19	6
II	140,87	4,98	21 ÷ 26	7
III	166,18	8,45	29 ÷ 35	18
IV	201,62	10,46	36 ÷ 40	24
V	206,95	12,6	40 ÷ 44	28
VI	234,78	11,8	47 ÷ 52	31
VII	249,12	13,3	46 ÷ 50	29
VIII	236,95	12,38	54 ÷ 60	34
IX	187,28	9,35	45 ÷ 50	31
X	156,22	7,72	33 ÷ 38	24
XI	128,38	3,26	25 ÷ 29	16
Общо	2153,16	100	-	-

Маркираните в таблица 4.3. резултати показват също така несъответствие в количеството генерирана електроенергия през по-хладните и слънчеви пролетни месеци и летните горещи месеци. Така например за м. май и юли съотношението е 206.95/249.12=0.83, докато регламентираното нормативно отношение на относителните дялове за средномесечната генерация е 12.6/13.3=0.94, т.е. ефективността на ФВЦ през по-хладния месец май, характерен с по-висока слънчева радиация, не е постигната. Аналогично е положението и при други пролетни и есенни месеци. Причината за това най-вероятно е незадоволителната работа на инверторите в точката на максимална мощност (MPPT), които не осигуряват оптимално управление на изходния ток и напрежение.

Изследване на електроенергийната ефективност в многофакторно пространство

В изследването на ФВС са регистрирани редица несъответствия в режимните параметри, незадоволителна генерация, откази, аварийни състояния, а също така принудителни прекъсвания от оперативен характер и случайни изключвания на обекти. Тези състояния, класифицирани като „аномалии“, се

оформят в две основни групи, (фактор А и фактор В) разгледани по долу, които имат съществено отражение върху електроенергийната ефективност на ФВС.

Фактор А, свързан с техническото състояние на ФВС

PV модулите са основен елемент за всяка ФВС. Най-използваните в страната панели са изградени с монокристални и поликристални клетки с максимална ефективност в границите (17÷20)%, основно китайско и немско производство.

. Изискването за високо качество на генерираната ел. енергия и постигане на електромагнитна съвместимост в съответствие стандартите е друг основен фактор от енергетично естество. Изследванията, проведени в съответствие с теоретичния подход, представен в т.3.3.2. и апаратурното приложение на подхода (т.3.3.3.) показват, че ПКЕЕ се изменят в доста широки граници представени по-долу [4,7,44,49]:

- *отклонение на напрежението $\delta_U=(2,4\div4,6)$ %;*
- *коефициент на несиметрия по напрежение $\varepsilon_U=(0,83\div2,96)$ %;*
- *коефициент на неуравновесеност по напрежение $\alpha_U=(0,23\div1,71)$ %;*
- *коефициент на несиметрия по ток $\varepsilon_I=(1,33\div4,68)$ %;*
- *коефициент на неуравновесеност по ток $\alpha_I=(0,59\div2,51)$ %;*
- *коефициент на несинусоидалност по напрежение $THD_U=(2,27\div8,34)$ %;*
- *коефициент на несинусоидалност по ток $THD_I=(2,76\div16,93)$ %.*

Представените стойности за ПКЕЕ много често надвишават нормативните изисквания на стандартите за качество на електрическата енергия. Следователно качеството на ел. енергия, генерираната от PV централите не винаги е задоволително, създават се условия за възникване на електромагнитна несъвместимост с параметрите на приемащата мрежа и повишени нива на загубите от влошени ПКЕЕ и от реактивна мощност. Тези загуби представени в диференциран вид, определени с помощта на изрази 3.1 се изменят в следните диапазони [1,18,21,33]:

- *Активни загуби от реактивна мощност $\Delta P_Q=(1,63\div7,24)$ %;*
- *Активни загуби от пулсираща мощност $\Delta P_N=(1,24\div1,91)$ %;*
- *Активни загуби от скрита мощност $\Delta P_{S_0}=(0,47\div1,22)$ %;*
- *Активни загуби от деформационна мощност $\Delta P_D=(1,03\div2,89)$ %.*

Сумарните загуби от реактивности и влошени ПКЕЕ ΔP_Σ са над 7% и техният дял от общите загуби в една ФВС е в границите (35÷40) %. Въз основа на направените по-горе анализи с помощта на израза 3.11, е определена средната

стойност на фактора на мощността PF, който за изследваното множество от ФЕЦ се изменя в границите:

$$PF = 0,83 \div 0,89$$

При съвременните изисквания за електроенергийна ефективност, тази стойност на PF е твърде ниска и не може да създаде условия за осигуряване на оптимални режими на експлоатация на изследваните PV системи.

Фактор В, свързан с експлоатационното състояние на ФВС

Замърсяването на PV модулите с прах и др. частици съкращава живота на панелите, предизвиква засенчване и повишена вероятност за почва на горещи точки. Аналогичен негативен ефект се получава при отлагане върху панели на листа, клони, полени, изпражнения от птици и др., като намаляването на ефективността на инсталацията в такива случаи може да достигне в границите (7÷50)%. Други често срещани негативни явления при експлоатация на PV системите са засенчване от дървета, електропроводи, антени, сгради и др. и при неправилна ориентация и наклон на панелите може да се получи голямо овлажняване и корозирание на конструктивни елементи. Почистването на праха и мръсните петна върху панелите се препоръчва да се извършва с вода с помощта на гъба или четка с меки косми. Моментът за почистване трябва да се оцени от информацията, получена от LED сензорите, които определят дебелината на слоя мръсотия, отложена върху панела. Тъй като през зимата мръсния студен въздух се разполага ниско до земята, то и замърсяването тогава е по-голямо. Препоръчва се обаче почистването на панелите да се осъществява през по-хладната пролет, а не през лятото и то рано сутрин или привечер. През лятото панелите са нагрети и не е правилно да се извършват подобни дейности. При наличие на снежна покривка добива на ел. енергия е по-малък поради намаленото проникване на светлината до панела. Препоръчва се в такива случаи да се използва антизамръзващи покрития на PV модули с повишена прозрачност. За ФВС, разположени в южна България, където температурата през лятото често е по-висока от 35 градуса целзий, е установено намаляване на генерираната мощност с около (4÷5)%.

Експлоатационните фактори, влошаващи състоянието и генерацията на изследваните PV съоръжения, могат да се систематизират и обобщят по следния начин:

- *Влияние на температурата. При висока температура е регистрирано намаляване на добива около (4÷5)%, а при ниски температури то е в границите (8÷19)%.*

- *Засенчване и замърсяване. Регистрирано е засенчване от дървета и сгради и замърсени от прах и полени, изпращания от птици и др. Влияние оказва също така трайни мъгли и снежни покривки. Регистрирани са повредени байпасни диоди, възникват високи температури (горещи точки) и изгарят PV клетки.*
- *Корозия на метални части. Съществува като масово явление във всички ФВС, вследствие проникване на влага. Протичат блуждаещи токове и се намалява нивото на генерация.*
- *Обезцветяване и разслояване на PV модулите. При висока влажност и високи температури се наблюдава този ефект. Съпроводен е с натрупване на голямо количество соли, което се регистрира с помощта на термовизионна инфрачервена диагностика.*

Потенциално и светлинно индицирана деградация-PID и LID. В няколко от изследваните ФЕЦ, вследствие възникване на високо напрежение, високи температури и лошо заземяване, блуждаещи токове и висши хармоници се наблюдава PID на PV модули. Аналогично, при първоначалното включване на PV системите и при всяко следващо включване е регистрирано LID за конкретни модули.

Математическа формализация на изследването

Схематичен алгоритъм за определяне сумите от квадратите на основното уравнение на дисперсионния анализ е разработен в табулиран вид, представен в таблица 4.4, в която са дадени оценките на дисперсията, а също така и степените на свобода. Представителна извадка за стойностите на ЕЕЕ са дадени в таблица 4.5, а изчислените стойности за параметрите на дисперсионния анализ са представени в таблица 4.6.

Табл. 4.4 Алгоритъм за определяне параметрите на дисперсионния анализ

Сума на квадратите	Степени на свобода	Оценки на дисперсията
Обща $Q = \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^q \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2$	$v = n \cdot k \cdot q - 1$	$S^2 = \frac{Q}{v}$
Между групите на фактор A $Q_A = n \cdot q \cdot \sum_{i=1}^k (\bar{y}_{io} - \bar{y})^2$	$v_A = k - 1$	$S_A^2 = \frac{Q_A}{v_A}$
Между групите на фактор B $Q_B = n \cdot k \cdot \sum_{l=1}^q (\bar{y}_{ol} - \bar{y})^2$	$v_B = q - 1$	$S_B^2 = \frac{Q_B}{v_B}$
Между групите на взаимодействието AB $Q_{AB} = n \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^q (\bar{y}_{il} - \bar{y}_{io} - \bar{y}_{ol} + \bar{y})^2$	$v_{AB} = (k - 1) \cdot (q - 1)$	$S_{AB}^2 = \frac{Q_{AB}}{v_{AB}}$
Остатъчна $Q_R = \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^q \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{x}_{il})^2$	$v_R = k \cdot q \cdot (n - 1)$	$S_R^2 = \frac{Q_R}{v_R}$

Табл. 4.5 Представителна извадка за изменение на ЕЕЕ.

A_i	A_1			A_2			A_3			A_4			\bar{y}_{ol}				
	$j (n = 3)$			$j (n = 3)$			$j (n = 3)$			$j (n = 3)$							
	1	2	3	\bar{y}_{1l}	1	2	3	\bar{y}_{2l}	1	2	3	\bar{y}_{3l}		1	2	3	\bar{y}_{4l}
B_l	Електроенергийна ефективност (КПД) η [%]																
B_1	16,2	17,1	19,4	17,6	18,4	18,6	18,5	18,5	17,1	15,3	15,8	16,2	16,2	14,4	15,3	15,3	$\bar{y}_{01} = 16,9$
B_2	13,5	14,4	15,3	14,4	14,4	13,6	13,9	13,9	15,8	17,1	16,2	16,7	14,9	17,6	16,2	16,2	$\bar{y}_{02} = 15,3$
B_3	12,6	12,7	13,9	13,1	17,1	15,3	16,2	16,2	14,0	13,5	15,8	14,4	15,3	17,6	17,1	16,7	$\bar{y}_{03} = 15,1$
\bar{y}_{io}	$\bar{y}_{10} = 14,99$			$\bar{y}_{20} = 16,2$	$\bar{y}_{30} = 15,75$			$\bar{y}_{40} = 16,065$			$\bar{y} = 15,8$						

Табл. 4.6 Изчислени стойности за параметрите на дисперсионния анализ.

Сума на квадратите		Степени на свобода	Оценка на дисперсията
Обща сума	$Q = 123,718$	$\nu = 35$	$S^2 = 3,535$
Сума между групите на фактор А	$Q_A = 7,982$	$\nu_A = 3$	$S_A^2 = 2,66$
Сума между групите на фактор В	$Q_B = 23,004$	$\nu_B = 2$	$S_B^2 = 11,502$
Сума между взаимодействието АВ	$Q_{AB} = 57,62$	$\nu_{AB} = 6$	$S_{AB}^2 = 9,6$
Остатъчна сума	$Q_R = 35,112$	$\nu_R = 24$	$S_R^2 = 1,463$

Издигната е нулева хипотеза H_0 за установяване поотделно влиянието на факторите А и В и на взаимодействието АВ като по формули (4.13), (4.14) и (4.15) са изчислени стойностите F' , F'' и F''' :

$$F' = \frac{S_A^2}{S_R^2} = 1,818; \quad F'' = \frac{S_B^2}{S_R^2} = 7,861; \quad F''' = \frac{S_{AB}^2}{S_R^2} = 6,561$$

Критичните стойности F_T на разпределение по Фишер при съответните степени на свобода ν и нива на значимост α са следните:

- за $\alpha = 0,05$ - $F_T^I = 3,01$; $F_T^{II} = 3,4$; $F_T^{III} = 2,51$
- за $\alpha = 0,01$ - $F_T^I = 4,72$; $F_T^{II} = 5,68$; $F_T^{III} = 3,67$

Вижда се, че са в сила неравенствата:

- $F^I < F_T^I$ - фактора А не оказва влияние върху ЕЕЕ (нулевата хипотеза H_0 се приема).
- $F^{II} > F_T^{II}$ и $F^{III} > F_T^{III}$ – фактор В и взаимодействието АВ имат значимо статистическо влияние върху ИП (нулевата хипотеза H_0 се отхвърля).

Проведеният дисперсионен анализ показва, че фактора А, т.е. техническото и технологично ниво не оказва съществено влияние върху изменението на ЕЕЕ. Техническите достойнства и предимства на този фактор, още в началото на експлоатация на съоръженията, са определили едно стабилно ниво на ЕЕЕ, което е константно във времето, промени в

стойността на този фактор във времето не настъпват и той не оказва съществено влияние върху ИП. Докато за фактор *B* се установи, че той има съществено влияние върху ЕЕЕ. Тъй като този фактор е свързан с експлоатацията на ФВС, може да се направи извода, че превантивните мерки за подобряване на експлоатационното състояние на PV системите имат значимо влияние върху възможностите за подобряване ефективността на тези съоръжения. Съчетаването на двата фактора *A* и *B* също може да окаже положително влияние върху този ИП. Тълкуването на същественото влияние на взаимодействието *AB* е свързано с възможността за постигане на висок ефект при някакво съчетание на PV системи с определени технически параметри и съответно най-подходяща експлоатация за тази система. В този случай може да се дефинира нова оптимизационна задача за определяне най-доброто съчетание между техническо решение и условията на експлоатация.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

1. В тази глава е представен анализ на актуалното състояние и развитието на фотоволтаичните клетки, инверторите и системите за съхранение на ЕЕ. Потвърдена е стратегията за утвърждаване на тандемните PV модули, подчертано е предимството на варианта с комбинирано използване на централни и стрингови инвертори и са посочени положителните страни и добрата перспектива на графеновите технологии в системите за съхранение на ЕЕ. Установено е, че прилагането на SMART GRID технологии и системите за изкуствен интелект, имат потенциал за реализиране на икономии на средства до 40% PV инсталациите. Синтезираният комплексен анализ очертава прогнозните тенденции за създаване на нови поколения PV модули, инвертори и батерии по критерий икономичност и надеждност.
2. Потвърдено е, че правилната поддръжка на ФВС е съществен и изключително важен показател за подобряване на ЕЕЕ. В тази връзка процеса на експлоатация трябва да осигури и да гарантира оптимални условия за работа на PV съоръженията. За целта е направен обстоен анализ на основните експлоатационни проблеми на PV системите, тяхното диагностициране и са маркирани технически решения за минимизирането им. В разглеждането е акцентирано върху прилагането на иновативни нанобазирани технологии, а също и на внедряване на автоматизирани и роботизирани системи за облекчаване процеса на експлоатация.
3. Проведено е изследване за установяване влиянието на слънчевата радиация, температурата и атмосферната маса върху ЕЕЕ. Представени са характерни резултати във вид на хистограми от измерването на слънчевата радиация в денонощен, месечен и годишен разрез, а също така е показано изменението на температурата на PV модули за ФЕЦ с мощност 2MW_p. Усреднени стойности

за слънчевата радиация и температурата на PV модулите са представени за всички изследвани ФЕЦ, оформени в табулиран вид. Анализът показва, че тези показатели се изменят твърде динамично, което създава сериозни затруднения на инверторите да прилагат адекватни алгоритми за управление. Констатирано е, че много често не се изпълняват изискванията за работа по критерий MPPT и това е основната причина за сравнително ниската ефективност на изследваните 14 ФЕЦ.

4. За определяне на ЕЕЕ е разработен алгоритъм, апробиран за ФЕЦ с мощност 2 MWp. В табличен вид в месечен разрез са определени генерираната ЕЕ, относителния нормативен дял на средномесечната генерация, средномесечната температура за региона и температурния диапазон на модулите. Получената с помощта на предложения алгоритъм стойност за ЕЕЕ е по-ниска от средната за страната. Установено е също така несъответствие в количествата генерирана ЕЕ през по-хладните и слънчеви пролетни месеци и летните горещи месеци. Доказано е, че причина за това е незадоволителната работа на инверторите в точката на максимална мощност (MPPT), които не осигуряват оптимално управление на изходния ток и напрежение.
5. Проведено е изследване върху ЕЕЕ в двуфакторно пространство на 14 броя ФЕЦ с различни мощности. Дефинирани са 2 основни съществени фактора, свързани съответно с техническото и технологичното състояние на PV инсталациите от една страна и с особеностите на поддръжката и разнообразието на експлоатационните характеристики на изследваните обекти от друга. Математическата формализация на изследователския процес е осъществена с приложение на “дисперсионен анализ” за два фактора, като първия фактор се изменя на 4 нива, а втория на 3. Съставено е основното уравнение на дисперсионния анализ, от 1 итащо влиянието на отделните фактори, ефектите на взаимодействие и остатъчната оценка на дисперсията. При определени степени на свобода и нива на значимост се установява влиянието на съществените фактори върху ИП, като се извършва проверка на 2 издигнати хипотези – нулева и алтернативна. Установено е, че фактора свързан с поддръжката и експлоатацията на ФЕЦ има съществено влияние върху ЕЕЕ. Съчетаването на двата фактора също указва значимо влияние върху изменението на ефективността, докато фактора, свързан с техническото и технологичното състояние на PV инсталациите не влияе съществено върху изменението на ЕЕЕ в процеса на експлоатация (той определя нейната проектна ефективност още в първоначалния период и я поддържа на определено стационарно ниво по време на експлоатация).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното изследване в 14 различни по мощност, технически параметри и експлоатационни характеристики ФВС, дават възможност да се представят и формулират общи насоки, указания и принципи за подобряване на режимите на работа и ефективността на тези инсталации. Направеният анализ на стотици литературни източници потвърди по безспорен начин липсата на дефиниция и научно обоснована методология на понятието „електроенергийна ефективност“ (ЕЕЕ) във ФВС. Това понятие трябва да се разглежда като отделна, напълно самостоятелна и независима енергийна категория, със своя нормативна база и стандарти за оценка на количествените и показателите на качеството на електрическата енергия, както и за собствени правила за одитиране. В тази връзка е необходимо да се разработят методики, даващи възможност за решаване на оптимизационни задачи по различни критерии с използване на вероятностно-статистически подходи (дисперсионен, регресионен, корелационен анализ, теория на планиране на експеримента и др. методи).

В настоящата разработка, в съответствие с поставените цели и задачи, е направен опит за реализиране на такъв подход. За целта, на базата на съставен алгоритъм, в годишен разрез са определени КПД на различните изследвани ФВС. Формулирани са два основни съществени фактори (А и В), свързани съответно с технологичното ниво и особеностите на експлоатацията на разглежданите обекти. Извършена е категоризация на четири и три нива за първия и втория фактор, съставена на база сходни характеристики. Тази формална общност от “КПД и влияещи фактори” се дефинира като „електроенергиен комплекс“, на който съответства понятието ЕЕЕ, възприето в настоящото изследване.

Високите технологии, изискващи големи инвестиции, не ни гарантират на 100% постигане на добра ЕЕЕ. Техническото и технологично ниво е предпоставка за устойчиво и стабилно състояние на електротехническите параметри и характеристики на ФВС през целия период на експлоатацията им. Упованието за постигане на добри резултати, базирани единствено на фактора „висока технологичност“ е недостатъчно и много често се оказва „илюзорно“, подвеждащо условие за проектантите и инвеститори. Пренебрегване на дейности, свързани с правилна и рационална експлоатация, не прилагане на превантивни мерки, целящи извличане на максимална мощност и създаване на висока надеждност на PV системите, трябва да се възприемат като проблем на тази важна прогресивна постановка за постигане на висока ЕЕЕ. **Основната стратегия при изграждане на ФВС трябва да бъде постигане на оптимално състояние на тези две съществени условия – прилагане на иновативни технологии и ефективна експлоатация.**

Получените резултати в настоящото изследване в пълна степен потвърждават тази концепция. Като основна информационна основа е проучено

технологичното и експлоатационно развитие в национален и световен аспект на слънчевата енергетика – този най-перспективен и прогресивен ВЕИ. Експерименталната постановка е базирана на представителна извадка от електроенергийни характеристики на избрани обекти, намиращи се в продължителна експлоатация. Методологията на изследване е научнообоснована, а получените резултати се характеризират с адекватност, значимост и достоверност. Потвърждава се с високо ниво на статистическа значимост ролята и високата резултатност на дейностите, свързани с осигуряване на добри експлоатационни условия за постигане на висока ЕЕЕ. Доказано е по безспорен начин, че това е значим фактор за рационализиране на режимите на работа и оптимизиране на енергетичните процеси на ФВС. Вторият съществен фактор, свързан с прилагането на високотехнологични иновативни технологии, осигурява стабилност, устойчивост и надеждност и гарантира стационарно ниво на експлоатация за дълъг период, но не представлява единствено и достатъчно условие за постигане на висока ЕЕЕ. Получените резултати от изследването потвърждават концепцията, че съчетаването на двата фактора осигурява постигането на високи нива на ЕЕЕ и на тази база за всяка конкретна PV инсталация трябва да се разработва оптимална стратегия, определяща най-доброто взаимодействие между техническото решение и условията на експлоатация.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Анализирани са литературни източници, свързани с проектиране, изследване, и експлоатация на ФВС. Формулирана е прогресивна стратегия за всеобхватно използване на различни технологии, характеристики и външни фактори в проектантския и изследователския процес. Анализирани са съвременни тенденции за развитието и усъвършенстването на PV модулите, инверторите и батериите по критерий “ЕЕЕ” и с отчитане на работните режими и условията за безопасност. Разработен е критичен експертен анализ на технико-икономическите проблеми при изграждане и експлоатация на ФВС, включително и във връзка с ниската използваемост на ВЕИ в страната.
2. Анализирани са теоретико-практични постановки и са набелязани и утвърдени условията за отдаване на максимална мощност от PV системите, включително и при частично засенчване. Представени са прогресивни комплексни показатели, т.н. “гъвкави методи” и са дефинирани предимствата на “общностите за ВЕИ”. Разработени са икономически прогнози за разходите, ползите и вредите от ВЕИ и е формулиран метод за оценка на ЕЕЕ на база стратегията “полза-разход”. Въз основа на дисперсионния анализ е синтезиран теоретичен подход за изследване влиянието на различни фактори върху ИП, даващ възможност за обосноваване на практически решения.

3. Установено е ускорено развитие на пазарните механизми, мениджмънта, маркетинга, растежът на работните места и инвестициите, а също така на цифровизацията, рециклирането, ел.транспорта, ефективността, термопомпите и др. сектори с използване на слънчева енергия. Доказано е, че новите технологични продукти при гъвкавите технологии осигуряват приходи, правят енергията “по-зелена” и увеличават живота на батериите. Прилагането на метода “полза-разход”, използващ концепцията на “дисконтирането”, представлява иновативна стратегия за прогнозиране на икономически показатели и апробирането му в изследователския процес потвърждава високо-ефективните му възможности.
4. Представен е комплексен анализ за развитието на ФВС, за тяхното диагностициране, набелязване на основните експлоатационни проблеми и за създаване на нови поколения PV модули, инвертори и батерии по критерий икономичност и надеждност, както и за внедряване на автоматизирани и роботизирани системи в процеса на експлоатация. За конкретна ФЕЦ с мощност 2 MWp и за останалите изследвани инсталации, са проведени изследвания и е регистрирана динамиката на слънчевата радиация и температурата в денонощен, месечен и годишен разрез. Установена е влошена работа на инверторите в резултат на което ефективността е с ниски стойности. ЕЕЕ се определя в съответствие с разработен за целта алгоритъм, като е констатирано несъответствие в генерираната през по-хладните и слънчеви месеци енергия и тази на летните горещи месеци, в следствие неефективна работа на инверторите. С прилагането на дисперсионен анализ в двуфакторно пространство, се установи влиянието на факторите върху ИП. На база на резултати от обективни изследвания е констатирано и доказано доминиращото влияние на фактора, свързан с експлоатационните характеристики на ФЕЦ. Потвърдено е и същественото влияние на ефекта от съвместното действие на двата влияещи фактора.

ПРИНОСИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

НАУЧНО ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. В теоретично и научно приложен аспект, на базата на “дисперсионния анализ”, е разработен вероятно статистически подход за определяне на характеристики и зависимости, свързани с електроенергийната ефективност на фотоволтаични системи. С помощта на синтезираната математическа постановка се определят количествено нивата на влияещите съществени фактори върху изходния параметър. Метода е универсално приложим, оценява с висока точност, достоверност и значимост съотношенията между случайните величини при изследване на вероятно статистически процеси, а също така

дава възможност за вземане на решения и обосноваване на съответни стахостични изрази.

2. Формулиран е метод за оценка на различни икономически показатели и характеристики на електроенергийната ефективност, апробиран за конкретна фотоволтаични системи. Той се базира на принципите на предложения от Европейският съюз метод “полза-разход” и представлява иновативна стратегия за прогнозиране на икономически показатели на фотоволтаичните инсталации. С използване на инструментариума на “дисконтирането”, методологията дава възможност да се оптимизират различни варианти и да се постигнат научно-обосновани решения.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Във връзка със загубите на мощност и електроенергия, които са основен компонент на електроенергийната ефективност, е предложена адаптивна методика, базирана на класическата теория на Ричард Дрехслер, с помощта на която се обхващат всички влияещи върху загубите компоненти на мощността. Метода е приложен за определяне на електроенергийната ефективност на изследваните фотоволтаични системи и се утвърждава като прогресивна и ефективна методология в това направление.
2. За целите на изследването са предложени два съществени фактора, представляващи фундамента за развитие на процесите, свързани с усъвършенстване на технологиите и оптимизиране експлоатацията на фотоволтаични системи. По принцип дефинираните фактори имат конвенционално-тривиален характер, но по същество при представянето им в систематизиран вид и прилагането на математически подходи дава възможност да се оцени количествено тяхното влияние върху електроенергийната ефективност.
3. Предложен е алгоритъм за определяне на електроенергийната ефективност, апробиран за фотоволтаична система с мощност 2MWp и за изследваните фотоволтаични системи. Метода отчита влиянието на интензитета на слънчевата радиация, генерираната електроенергия, относителната средно-месечна генерация за съответния регион и специфичните особености на фотоволтаичната инсталация. Характеризира се с простота на приложението, универсалност и задоволителна точност.

ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА ВЪВ ВРЪЗКА С ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. Ангелов М. Л., “Анализ на възможностите за електромобилите за балансиране на електроенергийната система“, Енергиен форум 2024, Варна, Сборник с доклади, стр. 501÷512, ISSN 2367-6728.
2. Адамов А. Й., Ангелов М. Л., Илиев И. Х., “Относно изисквания и особености при изчисляване и избор на кабелни мрежи за ФВЦ“, Енергиен форум 2023, Варна, Сборник с доклади, стр. 328÷339, ISSN 2367-6728.
3. Адамов А. Й., Ангелов М. Л., Панчев Х. И., “Изследване на електроенергийната ефективност на фотоволтаични системи с използване на метода на „дисконтиране на паричните потоци““, Научно списание „Механика, транспорт, комуникации“. Том 22, брой 3/2, 2024 г., статия №2530, ISSN: 1312-3823; ISSN: 2367-6620 (online).
4. Адамов А., Ангелов М., Луков М., “Тенденции в развитието на слънчевата енергия в световен аспект“, Енергиен форум 2024, Варна, юни 2024 г., Сборник с доклади, стр. 472÷488, ISSN 2367-6728.
5. Ангелов М. Л., Пройков М. А., Адамов А. Й., “Основни експлоатационни проблеми при фотоволтаичните системи“, Енергиен форум 2025, Варна, Сборник с доклади, стр. 583÷594, ISSN 2367-6728.
6. Ангелов М. Л., Пройков М. А., Иванов В., “Съвременни прогнози и тенденции за проектиране и развитие на фотоволтаични системи“, Енергиен форум 2025, Варна, Сборник с доклади, стр. 595÷608, ISSN 2367-6728.
7. M. Angelov, A. Adamov and M. Lukov, "Possibilities of Optimizing the Mode of Operation of Photovoltaic Plants," *2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria, 2024, pp. 1-3, doi: 10.1109/BulEF63204.2024.10794825
8. M. Angelov, A. Adamov and M. Lukov, "Creation of Rational Technical Solutions in the Construction of Photovoltaic Systems," *2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/BulEF63204.2024.10794892.
9. R. Demirev, A. Adamov and M. Angelov, "Comparative Analysis and Options for Construction Lightning Protection and Grounding Installations of Photovoltaic Systems," *2024 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, Bulgaria, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA61056.2024.10637853.
10. Adamov, M. Angelov, H. Panchev and I. Iliev, "Regarding the Development of Technologies and Marketing of Photovoltaic Systems for the Production of Electrical Energy," *2023 15th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/BulEF59783.2023.10406231

11. Adamov, M. Angelov, H. Panchev and I. Iliev, "Technical Possibilities for Monitoring and Diagnostics of Photovoltaic Plants," *2023 15th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/BulEF59783.2023.10406256.

SUMMARY

RESEARCH AND ANALYSIS OF THE ELECTRICAL ENERGY EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS CONNECTED TO THE TRANSMISSION AND DISTRIBUTION NETWORK

Author: M.Sc.Eng. Miroslav Lyubomirov Angelov

The dissertation analyzes the electrical energy efficiency of operating PV plants and conducts a research process on multiple photovoltaic systems, which allows for the formulation of optimization processes according to various criteria. Based on an in-depth study of various sources, theoretical statements and methodologies with a high degree of applicability in research are highlighted. A theoretical approach has been synthesized using the apparatus of probability theory and mathematical statistics and, by applying dispersion analysis, modeling of energy processes has been performed according to the criterion of optimal electrical energy efficiency. Economic analyses have been conducted using a scientifically based approach with a high degree of significance and reliability, using the discounting principle.

The results of the research, obtained using a progressive scientifically based methodology, are characterized by a high level of reliability and adequacy. The essential role of good operating conditions in achieving high electrical energy efficiency has been confirmed. The application of innovative technologies in the construction of PV systems ensures stability, sustainability and reliability of photovoltaic systems and, in combination with high operational requirements, guarantees the achievement of significant results in the production of electricity. The application and proper use of the research results in real sites will lead to an increase in the level of generated electricity and improvement of its quality, and also achieve rationalization and optimization of the operational characteristics and mode parameters of operating PV plants.