Минно-Геоложки Университет

“Св. Иван Рилски” – гр. София

Минно електро-механичен факултет

КАТЕДРА “ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИКА ”

МАГ. ИНЖ. Антон Йорданов Адамов

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА РАЦИОНАЛИЗИРАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА МЕТОДИТЕ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ, ИЗГРАЖДАНЕ И ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за придобиване на образователна и научна степен „ДОКТОР“

По професионално направление:

5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Докторска програма „Електроснабдяване и електрообзавеждане“

Научен ръководител:

Проф. д-р Кирил Сталинов Джустров

СОФИЯ

2025 г.

Дисертационният труд е обсъден от разширен катедрен съвет на в катедра "Електроенергетика и автоматика" към МГУ "Св. Иван Рилски" на 20.05.2025г. и насочен за защита към Научно жури.

Рецензенти:

……..

……..

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 05.09.2025г. от 13:30 часа в зала 204Б на МИННО – ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ "Св. Иван Рилски" за присъждане на образователна и научна степен "Доктор" пред Научно жури.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на сектор "Следдипломна квалификация" на МГУ "Св. Иван Рилски"

Адрес: 1100 София, Студентски град

МГУ "Св. Иван Рилски"

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на проблема

Дисертационният труд е посветен на решаването на проблема с рационалните и оптималните методи за проектиране, изграждане и експлоатация на фотоволтаични системи.

Проблемите са особено актуални и съответстват на задачите, поставени пред нас за повишаване на енергийната ефективност. Правилното проектиране и изграждане на възобновяемите енергийни източници би довело до увеличаване на тяхната ефективност с рационално използване на природните ресурси. Оптималната експлоатация на фотоволтаичните източници на електрическа енергия е предпоставка за увеличаване на коефициента им на полезно действие, както и увеличаване на производствения им ресурс.

В дисертационния труд е направен задълбочен анализ на съществуващите методи за проектиране, изграждане и експлоатация на фотоволтаични електроцентрали. Направени са теоретични изследвания, като са използвани съществуващи методологии и са съпоставени с експериментални изследвания. Експериментално е изследвана ефективността на съществуващи централи с различни мощности и в различни региони на Р. България. Тези изследвания дават възможност да бъде извършен комплексен анализ с оценка на енергетични и експлоатационни показатели.

2. Цел и задачи на дисертационния труд

Като резултат от прилагането на експертни подходи за състоянието на фотоволтаичната енергетика, проучването на тенденциите за развитието на технологиите и пазарите и свързаните с това нормативни и проектни правила и условия за изграждане и поддръжка на ФВС, може е формулирана следната цел на настоящата разработка:

Да бъде оценена възможността за прилагане на оптимални и рационални методи за проектиране, изграждане и експлоатация на фотоволтаични системи.

За постигане на формулираната по-горе цел се решат следните задачи:

- задълбочено и аналитично проучване на литературни източници на съвременните тенденции, особености, изисквания и иновации при фотоволтаичните системи, в резултат на което да се синтезира вероятностно-статистически модел за оптимизиране работата на ФВС.
- анализиране на нормативни документи и методите за проектиране, изграждане и експлоатация на ФВС, като за целта да се изучи европейското и националното законодателство, принципите на фотоволтаичното преобразование, развитието и приложението на PV клетките и модулите, съвременните инвертори и изискванията за оптималната им експлоатация, както и системите за съхранение на енергия, измерване, наблюдение, мониторинг и управление на PV съоръжения.
- Провеждане на теоретични и експериментални изследвания с цел повишаването на електромагнитната съвместимост (EMC) и електроенергийната ефективност при проектирането, изграждането и експлоатацията на фотоволтаичните системи.
- На базата на разработен вероятностно-статистически модел, се прилага за реални ФВС, като са синтезирани математически модели и се анализират съществените фактори (СФ) и изходните параметри (ИП) за постигането на целта.

3. Обект на изследване

Направеното разглеждане обосновава необходимостта от задълбочено изследване на работа на действащи ФВС с цел анализиране на състоянието на фотоволтаичната енергетика и набелязване на мерки за подобряването им. В тази връзка са подбрани 3 на брой подходящи и достъпни ФЕЦ от различни региони на страната с мощности в диапазона 400 kWp до 20 MWp, с различни характеристики и режимни параметри, за които е проведено научно-обосновано изследване.

4. Методи за изследване

Като основна информационна база в дисертацията са послужили данни за

електрическите характеристики на различните изследвани обекти, получени чрез пасивен или активно-пасивен експеримент. Анализът и моделирането им се извършва с апарата на математическата статистика и теория на планиране на експеримента. Използваните теоретични постановки са анализирани и доразвити чрез класически подходи или чрез използване на софтуерни продукти. Апаратната част за изследванията представляват измервателен комплект, съставен от високотехнологични компютърни и микропроцесорни компоненти.

5. Нови научни резултати

1) Анализирани са съвременните тенденции за проектиране и прилагане на иновативни технологии, оптимизиране на изграждането и експлоатацията на PV инсталации по критерий надеждност и сигурност с цел минимизиране на риска. Предложен е теоретичен подход, на база на ТПЕ за оптимизиране на СФ и ИП в многофакторно пространство, представляващ иновативна постановка, приложима при изграждане на съвременни ФВС.

2) Направен е задълбочен анализ на достиженията при проектиране, изграждане и експлоатация на ФВС, развитието и усъвършенстването на ново поколение PV модули, съоръжения и компоненти, иновативни технологии и продукти в светлината на постигането на висока технико-икономическа ефективност, експлоатационна стабилност и сигурност. Направен е анализ на архитектурните и структурните особености на системите за измерване, наблюдение, мониторинг и управление на ФВС от гледна точка на диагностичен контрол, като са подчертани възможностите за използване на прогресивните технологии на изкуствения интелект, невронните мрежи, размитата логика и др.

3) Симулирането и моделирането е мощен инструментариум за постигане на оптимални характеристики при ФВС. Синтезирани са математически модели на градивните елементи на ФВС, PV модула е моделиран при стандартни условия и при изменение на слънчевата радиация, температурата и засенчването, а мощностните V-A характеристики са адаптирани за

изследване в среда MathCAD. Предоставено е моделиране и симулиране на напрежението и тока на заряд и разряд на оловно-киселинните батерии в среда Lab VIEW, като измервателния процес се извършва с помощта на DAQ карта в екселска среда. Получените резултати от проведеното моделиране и симулиране потвърждават неговата ефикасност и целесъобразност при изследване на PV съоръжения.

4) За провеждане на реални изследвания на свързани към мрежата ФВС е приложена синтезираната в т. 4. 2. методика, с помощта на която се оценява качеството на ЕЕ, парциалните загуби на активна мощност ΔP_Q, ΔP_N, ΔP_{So}, ΔP_D определени чрез субстанциите на мощността Q, N, S_0, D. С отчитане на тези особености, фактора на мощността PF, е определен чрез прилагане на прецизен и точен иновативен подход, съществено различен от класическия. В резултат на направения пълен анализ се установени редица неблагоприятни положения при експлоатацията на ФВС, технически дефекти и повреди, аномалии и влошено енергийно състояние на PV съоръженията.

5) Потвърдено е, че при режим на ниска генерация, се влошават всички маркирани по горе показатели, респективни мощността и добива на ФЕЦ. В тази връзка, за минимизиране на тези негативни явления е приложен комплексен многофакторен подход, формулиран на базата на ТПЕ, който дава възможност да се оптимизират режимните параметри и подобри електро-енергийната и икономическа ефективност на експлоатираните PV системи. Полезността на проведения изследователски процес се потвърждава от формулираните ценни препоръки за рационализиране и оптимизиране на технико-икономическите характеристики на ФВС.

6. Реализация в практиката

Предложените постановки могат успешно да се използват за рационализиране и оптимизиране на проектантските процеси, а също така и при изграждане и експлоатация на ФВС. Проведените изследвания в конкретни ФВЦ и техния анализ предоставят възможност за подобряване режимите на експлоатация на съответните централи и постигане на по-висока и по

качествена генерация на ЕЕ.

7. Апробация на работата

Основните резултати в дисертацията са докладвани на престижни международни конференции в страната и чужбина. По дисертационния труд има общо 9 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 152 страници.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА – Състояние на проблема

Съвременни тенденции за развитие и проектиране на ФВС

Човечеството ежедневно изразходва с две стотни от процента повече енергия от предния ден, като на 10÷15 години консумацията се удвоява. Предстоящото изчерпване на конвенционалните енергийни източници в 50 годишна перспектива е предизвикателство за все по-голямата употреба на ВЕИ, като фотоволтаичните технологии са с най-голямо бъдеще, т. к. електричеството се произвежда директно от слънцето, без произвеждане на вредни емисии, шумове, смущения с възможност за базиране в космоса, децентрализирана генерация без необходимост от скъпи конвенционални инфраструктури. Най-важното им качество е голямото екологично предимство, допринасящо за намаляване на глобалното затопляне [8, 118].

В България слънчевото време е в границите на 2200÷2500 часа годишно, като страната условно може да се раздели на три зони, в които сумарната слънчева радиация се изменя от 1410 до 1600 kWh/m^2 [38]. От гледна точка на ефективност е прието за целесъобразно да се използват PV системи при слънчево греене с продължителност по-голяма от 6, 5 часа на ден и плътност на радиацията по голяма от 0, 41 kW/m^2. Това означава, че средно за България,

една PV централа би работила полезно и ефективно в рамките на 180÷210 дни в годината [118].

Тенденциите за развитие на PV енергетиката с хоризонт 2030 г., в съответствие с "Пътна карта 2030", очертава изграждането на фотоволтаици в световен мащаб в границите на (50÷200) GW. По отношение на цената на енергията от PV централите, след като през 2010 г. за домакинствата беше преодоляна границата 0, 17 €/kWh, се очаква за индустрията през 2025г. 2030г. цените да достигнат съответно 0, 1 €/kWh и 0, 05 €/kWh [21, 24, 27, 93].

Правилното проектиране на ФВЦ е от решаващо значение за постигане на висока производителност при генерацията на ЕЕ. За точна оценка на добива е необходимо да се прогнозира слънчевия ресурс (радиация) в мястото на инсталиране на централите. В [59, 60] е предложено, за извършване на тази дейност, да се използват изкуствени невронни мрежи (ANN). За прогнозиране на генерираната активна мощност от ФВЦ са формулирани седем различни алгоритъма. Метода е апробиран в реални обекти, като е определена среднота и средно-квадратичната грешка (MAPE и RMSE). Недостатък на предложеният модел е, че не се отчита влиянието на температурния режим върху генерацията на ЕЕ. Според редица изследователи, получените резултати чрез ANN са по-добри от резултатите, получени от прилагане на векторен метод (SVM) и използването на "Калман Филтър" (KF) [90].

В съвременните ФВЦ, за регулиране на генерираната активна мощност, се изисква, още на ниво проектиране, разработване на стратегия за контрол. В [111] е предложена такава методология, базирана на "размита логика" и разработена на две йерархични нива. Проектираните ФВС имат централен контролер и множество локални контролери. За съхранение на енергията се използват батерии, с помощта на които се извършва и регулиране на честотата на мрежата.

Особености, изисквания и иновативни технологии, приложими към съвременните ФВС

Фотоволтаичното преобразуване е открито от Бекерел през 1839г., а за

първи път на практика Бел демонстрира фотоволтаичен ефект в силициев елемент (кристал). При облъчване със светлина (фотони) с достатъчна енергия, може да се отдели електрон в кристала, като се получава положение на положителен заряд (дупка) и отрицателен заряд на свободния електрон. Тези положителни и отрицателни заряди се движат свободно в кристалната решетка и създават електричество. Чрез прибавяне на донорни (атоми на бор, фосфор и др. Елементи) се интезифицира процеса на формиране на фототок и електрическо поле. Минималната енергия за отделяне на електрон представлява "забранена зона", под която фотоните не могат да отделят електрони.

Висшите хармоници (в.х.) на тока и напрежението, са основен проблем при ФВС, т.к. се увеличават загубите на активна мощност от в.х., претоварват се силовите трансформатори (СТ) и нулевия проводник на системата и може да възникнат смущения и неизправности в релейните защити и другите защитни устройства. Нивото на генерираните в.х. зависи в голяма степен от типа и мощността на инвертора и с въвеждането на новите технологии, базирани на IGBT транзистори по технологията PWM, се произвеждат по-малко количества в.х., в сравнение с по-старите технологии. Споменатата по-горе технология ANN представлява високо-ефективен модел за регистриране на нелинейността на системата, като резултатите от изследването са по-добри от тези, получени по методологиите SVM и KF [70]. Изследвания в [88] и [89] показват, че при натоварване на ФВС под 10% от номиналната мощност, съществува повишена вероятност за възникване на субхармоници на тока и напрежението (в.х. с честота по-ниска от 100Hz). Тези хармонични изкривявания зависят от броя на ФВС и тяхното местоположение в ЕЕС. Счита се, че основната причина за поява на субхармоници е несинхронността в поведението на електрическите подсистеми, свързани със силовата електроника, т.е. страната на DC на преобразователя и страната на AC на инвертор. Като възможна причина за поява на субхармоници в [89] се посочва влошения контрол върху MPPT системата за намаляване нивата на в.х. и генерираната реактивна мощност, в редица публикации се предлага намаляване на мощността [84,98].

Оптимални условия на поддръжка и осигуряване на висока надеждност и сигурност на PV системите

При продължителна експлоатация фотоволтаичните модули стареят, като след 20÷25 години използване, фирмите производители регламентират понижение на номиналната мощност с около 20%. Амортизацията може да се изразява в деградация на материалите, като например счупване на стъкло, диелектрични нарушения, повреди на защитните диоди (байпасни и блокинг) и др. Нарушаването на връзките между отделните слоеве на модулния ламинат, т.е. разламиниране вследствие на загуба на адхезия, най-често се случва в предната част на модула и води до оптическо разделение на материалите, влошено пропускане на слънчевата светлина, прекъсване на топлопредаването и загряване на клетките. Нарушаване на връзките между клетките в кристално-силициевия модул е вследствие на промяна на свойствата на запояващата сплав (SnPb) или в резултата на термодинамично стареене. Изследванията обаче потвърждават, че PV модулите са най-надеждния елемент в системата и маркираните по-горе деградации на влошават съществено работните характеристики на фотоволтаиците. Не така стои въпроса с надеждността на работата на инверторите. Около 60% в регистрираните аварийни състояния на PV централи се дължат на неизправности в инверторите. Най-често срещаните дефекти са в електронните и микропроцесорните компоненти, повреди в предпазители и др. Защити, повреди от пренапрежения въпреки наличието на специални защити от попадение на мълния и др. Наблюдават се аварийни ситуации и от неправилни монтажни дейности, повреди в кабелите от бързо стареене вследствие на ултравиолетово облъчване, повреди в носещата конструкция и др.

Диагностицирането на повреди във ФВС може да се извърши с помощта на инфрачервена тергмография и електролуминисцентенция (EL). За целта редица изследователи използват летателни системи UAS (антени, хеликоптери, безпилотни летателни апарати, дронове и др.) [51,74], а EL изображения са получени даже при ярка дневна светлина.

Замърсяването на ФВС с прах и др. реагенти, може да намали генерацията в границите (6,9÷16,4)%. Изследователите в [109], с помощта на спектрометър, сканиращ електронен микроскоп и рентгенов апарат, показват, че основните загуби при PV системите, освен от праха (16÷29 %), се причиняват и от корозия, обезцветяване, разслояване и др. (71÷84 %).

Като енергийно най-бедна страна в ЕС, съществува и най-голям риск за енергийна сигурност, определен от следните фактори:

- Ограничен достъп до ресурси и инфраструктурни мрежи.
- Сигурност и надеждност в електроснабдяването и енергийните доставки.
- Създаване на условия за екологична устойчивост.

Изводи:

1. Представени са съвременните тенденции за развитие и проектиране, а също са проучени особеностите, изискванията и иновативните технологии, приложени към съвременните ФВС. Проследените и анализирани източници, дават широка представа на процесите и явленията при всички PV съоръжения и са основополагащи за провеждане на задълбочен изследователски процес.

2. Експлоатацията на PV системите трябва да се извършва при оптимални условия на поддръжка и осигуряване на висока надеждност и сигурност на фотоволтаичните съоръжения. Предложени са за внедряване редица изисквания, подобрения и усъвършенствани решения, както със стандартни характеристики, така и с нетрадиционни такива. Направеният анализ посочва методите за прилагане на ефективни действия за минимизиране на риска и повишаване на надеждността при експлоатация на PV системи за условията на нормативната уредба в България.

3. Разгледани са нормативни изисквания и стандарти на европейско и национално ниво и тяхното еднопосочно преливане. Формулиран е специален подход за извършване на прецизен анализ по отношение на енергийната ефективност и нормативните документи за ФВС. Доказано е, че Р. България осигурява необходимите условия за транспониране и развитие на законодателните мерки и тяхната хармонизация с европейските норми.

ВТОРА ГЛАВА - Анализ на методи за проектиране, изграждане и експлоатация на фотоволтаични системи.

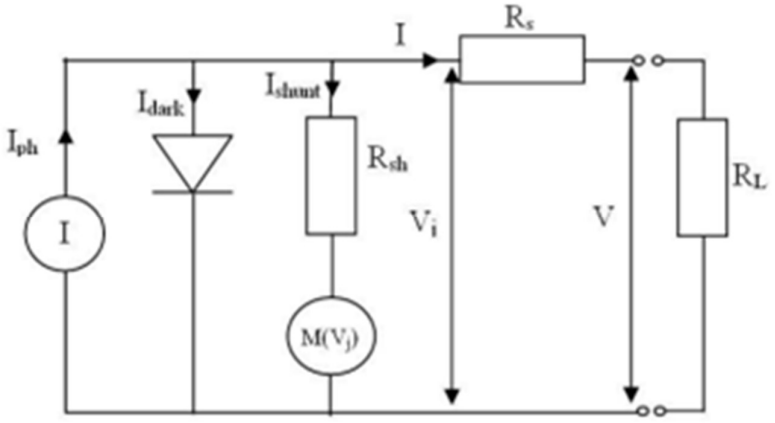
Анализ на особеностите при проектиране на ФВС.

Фотоволтаичните клетки се проектират за експлоатация при най-различни природни условия арктическа, пустинна, морска, тропична и дори космическа среда. Съставът на материалът на фото клетката и неговата атомна структура оказват съществено влияние върху неговите характеристики и производителност. Основните PV материали са силиций (S), галиев арсенид (Ga As), меден, индиев диселенид (Cu In Se2), кадмиев телурид (Ca Te), индиев фосфид (In P) и мн. др.

Основен материал за фотоволтаичните клетки е Si, който е два вида –p-тип Si и n-тип Si. Светлината с определена дължина на вълната λ (честота ν) йонизира атомите в силиция, създава се електромагнитно поле с отрицателни заряди (електрони) и положително заредени (дупки). Дупките оформят p-слоя, а електроните n-слоя на полупроводника. Под въздействие на светлината (фиг. 2.1), в електрическата верига се генерира електрически ток, тъй като свободните електрони преминават през товара и рекомбинират с положителните дупки [82, 114, 128, 131].

Фотоволтаичните клетки са специално обработени за да създават електрическо поле с положителен p полюс (задна страна) и отрицателен n полюс (предна страна, обърната към слънчевата светлина). Когато фотони ударят фотоволтаичната клетка, електроните се отделят от атомите на полупроводниковия материал и се създава двойки електрон-дупка. С помощта на електрически проводници свързани към положителния и отрицателния полюс, се образува електрическа верига и електроните създават електрически ток, наречен фототок $I_{рн}$. При тъмните, фотоволтаична клетка не е активна и работи като диод (p-n преход), като не се създава напрежение и ток. Ако обаче се приложи външно напрежение, се генерира ток, диоден или тъмен ток I_D. На

фиг. 2.2 е представен еднодиоден модел на фотоволтаична клетка. Фотоволтаичния модул се състои от няколко клетки, а



Фиг. 2.2 Еднодиоден модел на PV-клетка

няколко PV модула съставят фотоволтаичен масив. PV клетката е източник на ток I_{PH} и има вътрешно съпротивление R_S, последователно във веригата. Диодът има вътрешно шунтово съпротивление R_{SH}, включено последователно във веригата. Резултатния ток I е разлика между фототок I_{PH} и диоден ток I_D с отчитане на собствения ток на PV клетка I_C [82].

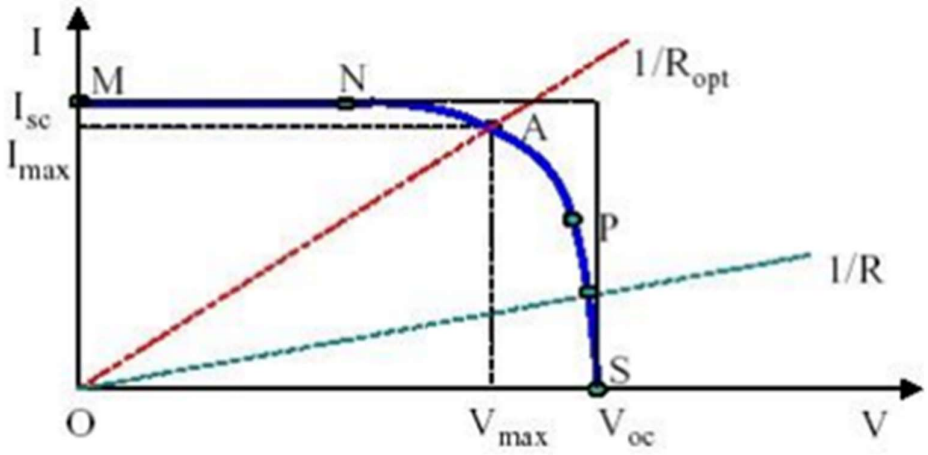
$$\mathbf{I= I_{PH} - I_D - I_C = I_{PH} - I_D - \frac{V+I.Rs}{Rs_H}} \qquad \mathbf{(2.2)}$$

В [82] е представен израза за резултантния ток в зависимост от параметрите на елементите на веригата:

$$\mathbf{I= I_{PH} - I_o \left[e^{\frac{e(V+IR_S}{K.T_c}} - 1\right] - \frac{V+I.Rs}{Rs_H}} \qquad \mathbf{(2.3)}$$

където: К- константа на Болцман (к= 1381.10^{-23} [Y/K]); T_e – абсолютна температура на клетката (К); е – заряд на електрона (е= 1602.10^{-19} [Y/K]); V-напрежение между двата полюса на PV клетката; I_O –тока на насищане на диода, който зависи силно от температурата [A].

На фиг.2.3 е показана волт-амперна характеристика на конкретен PV модули и характеристика на изменение на мощността му [101]:



Фиг. 2.3 V-A характеристика за конкретен PV модул.

Приложение на високо ефективни и надеждни PV системи.

Има два основни вида PV системи за производство на енергия [82, 87]:

- *Автономни PV системи.*
- *Свързани към мрежата PV системи.*

Автономните системи се състоят от PV генератор батерии за съхранение на енергия, контролери, променливо токови (AC) и постоянно токови (DC) потребители и преобразуватели. PV генератора обикновено се състои от няколко PV масива, като всеки масив се състои от множество PV модули. Батериите съхраняват енергията, когато мощността на PV генератора превишава мощността на токовете и предават PV енергия, когато PV предаването е недостатъчно(нощно време). Натоварването се определя от DC потребители (телевизори, осветление и др.) и от AC потребители (електродвигатели , компресори и др.). Системата за регулиране на мощността (инвертори и др.) осигурява интерфейсна връзка между всички елементи на PV системата, като гарантира сигурна защита и управление. [77, 94, 106, 178]:

При свързване към мрежата PV системи, генерираната през деня енергия може да се използва веднага за офиси, търговски и промишлени сгради и др. или да бъде преобразувана на ЕРП-тата. Вечер като PV системата не генерира

енергия, потреблението се извършва чрез захранване на електроснабдителното предприятие.

Капиталовите разходи, за изграждане на ФВС с тънкослойни клетки, са спадна ли под 1 $/W, след 2020г., което в сравнение с 1990 е намаление около 10 пъти. За същия период, цената на PV модулите от 7 $/W през 1990г., се е понижила на 2 $/W за 2020г. Средната годишна глобална радиация за България е 1,517 kWh/m^2 докато за Германия е 1,147 kWh/m^2, т.е. с около 30% по-ниска. Следователно географското положение на България е много благоприятно за използване на потенциала на слънчевата енергия. Техническата ефективност на ФВС се определя от коефициента на полезно действие (КПД) $\eta_{\text{тех.}}$:

$$\eta_{\text{тех.}} = \frac{\text{изходяща полезна енергия от системата}}{\text{енергия подадена към системата}} < 1$$

В лабораторни условия са постигнати нива на $\eta_{\text{тех}}$, надвишаващи 40%, но в режим условия, в зависимост от използваната технология, $\eta_{\text{тех.}}$ може да бъде в границите (15÷22) %.

Икономическата ефективност $\eta_{\text{икон.}}$ се определя като съотношение на прогнозните ползи и общите разходи по време на експлоатационния период:

$$\eta_{\text{икон.}} = \frac{\text{ползи от проекта}}{\text{разходи за реализация на проекта}} > 1$$

За разлика от $\eta_{\text{тех.}}$, който е винаги по малък от 1, $\eta_{\text{икон.}}$ е по-голям от 1, т.к. проекта ще реализира печалба, по-голяма от вложените средства.

Основните експлатациоционни проблеми PV системи са следните:

- Прекъсване работата на PV системата от инверторите вследствие увреждане от влага, високи температури, неправилно заземяване, удари от мълния и предизвикани диодни к.с., пукнати в модула - потенциално индуцирана деградация (ПИД).
- Деламинация на слънчевите панели - между стъклото и клетките, между клетките и задната платка, разслояване вследствие лошо омрежване и др.

- Влияние на температурата. PV панелите имат оптимален термичен режим при температура между 15 и 35℃ и тогава работят с най-висока ефективност. При температури над 35- 40℃ се наблюдават негативни явления:

- Намалява ефективността на соларния панел. Всъщност високите температури намаляват електронната проводимост на фотоклетките и се намалява ефективността на преобразуване на светлинната енергия в електрическа.

- Намаляване на мощността. Високите температури понижават напрежението на соларния панел, респективно капацитетите на PV модула за генерирана ел. енергия.

- При високи температури соларните панели и техните конструктивни съоръжения се разширяват, увеличава се вероятността за деформация на различни елементи и риска от повреда.

Тези негативни явления може да се минимизират, като се оптимизира наклона на PV панелите и усвояване на максимална радиация, постигане на добра вентилация и разсейване на топлината чрез система за проветряване и охлаждане, най-често водно, а също използване на други технологии за активно охлаждане.

Ниските температури също оказват негативно въздействие при експлоатацията на PV системите:

- Намалява се мощността на ФЕЦ. Напрежението на соларните панели с понижаване на температурата се увеличава, но токът намалява, а с това и мощността и генерираната енергия на панелите.

- Ниските температури могат да направят PV модулите и конструкцията по-крехки, да се получат пукнатини от замръзване, да настъпят структурни изменения и други промени.

- При снежни навалявания се намалява достъпа на слънчева светлина до панелите и се понижава генерацията на ЕЕ. При дебели снежни покривки с по-

голямо тегло може да се получи значително натоварване на конструкцията и на механични повреди.

Съвременни инвертори и изисквания за оптимална експлоатация

Инвертора преобразува енергията от DC в AC. Те използват специално управление PV системи за включително за работа в точката на максималната мощност (MPPT), тока и за анти-островна защита. Класифицират се в три основни типа:

- Самостоятелни инвертори. Те черпят своята DC енергия от батерии, заредени от PV масиви или друго ВЕИ, като ветрогенератори, хидрогенератори, дизел генератори и др. Обикновено имат вградени зарядни устройства за зареждане на батерията от AC източника, нямат взаимодействие с външното електроснабдяване и следователно се изисква да имат анти-островна защита
- Самоизключващи се инвертори. Мрежовите инвертори се проектират да се изключват автоматично при загуба на DC захранване на съображение на безопасност. Те не предоставят резервно захранване по време на прекъсване на захранването от PV генератора.
- Батерийно резервни инвертори. Това са специални инвертори, които черпят енергия от батерии, като управляват заряда на батериите чрез вградено зарядно устройство и изнасят излишната енергия към електрическата мрежа. Тези инвертори могат да доставят ел. енергия по време на прекъсване на електроснабдяването и се изисква да имат анти-островна защита. [122]:

Инверторите могат да бъдат еднофазни и трифазни. Някой инвертори могат да се използват за захранване на ел двигатели с големи пускови токове, други имат органичен капацитет и ограничени възможности за пренапрежения и ударни (пускови) токове. Основна характеристика на инверторите с ефективността на мощността или КПД на инвертора $\eta_{инв}$ [82]. Освен трансформацията от DC в AC, основна функция на инвертора е да подържа постоянно напрежение от страна на AC и да входната мощност $P_{вх}$ в изходяща мощност $P_{изх}$ с възможно най-висок КПД $\eta_{инв}$ [82, 97, 100, 103]:

$$\eta_{инв} = \frac{P_{изх}}{P_{вх}} = \frac{Uac \,.\, Iac}{Udc \,.\, Idc} \,.\, \cos\varphi \qquad (2.6)$$

където: U_{AC}, U_{DC}, I_{AC}, I_{DC} са напрежения и ток от страна на AC и DC мрежата; cosφ- фактор на мощността (THDI) от страна на инвертора. За подобряване на ефективността на PV системата и инвертора е необходимо да се намалят загубите в полупроводниковите PV модул, загубите, причинени от различни превключвания и загубите в мрежата AC и DC. [80]:

Обикновено фирмите предоставят информация за ефективността на инверторите при пълно натоварване. Такъв подход е некоректен, т.к. по-голяма част от времето инверторите не работят при пълно натоварване. Европейският стандарт препоръчва ефективността на инверторите да се оценява при различно натоварване - 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 100% и 110%. Стандарта дава възможност да се сравнят различни инвертори с различна ефективност като се вземе предвид продължителността на времето, при които инвертора се очаква да работи при определено процентно натоварване, т.е. ниво на слънчева радиация. Например общия КПД за даден инвертор за определена географска ширина, може примерно да се определи по израза:

$$\eta_{EURO} = 0,03 \,.\, \eta(5\%) + 0,06 \,.\, \eta(10\%) + 0,013 \,.\, \eta(20\%) + 0,1 \,.\, \eta(30\%) + 0,48 \,.\, \eta(50\%) + 0,2 \,.\, \eta(100\%)$$

където: цифрите означават частта от времето, през което инвертора работи при посочената процентна ефективност (например 0,2 . η (100%) означава работа при 100% ефективност с продължителност 20% от общото работно време).

С помощта на тази методика може да се определи ефективността на даден инвертор и да се сравни с ефективността на друг инвертор, като по този начин се оцени доколко реализираното или предстоящото за реализиране проектно решение е ефективно или неефективно.

Понастоящем на пазара се предлагат предимно два вида инвертори централни и стрингови. Всеки от тях има своите предимства и недостатъци. Посредством технологични иновации могат да бъдат разработени решения.

съчетаващи преимуществата на двата вида инвертори, същевременно елиминирайки недостатъците им.

Развитие и усъвършенстване на системите за съхранение на ЕЕ, генерирани от ФВС

Технологиите за съхранение на ел. енергия са целесъобразно и ефективно допълнение към възобновяемите енергийни източници, респективно фотоволтаиците т.к. те дават възможност за баланс между предлагането и търсенето на енергия [75, 76, 86]. Чрез този подход се избягват евентуалните загуби, когато имаше излишно предлагане на енергия и се осигурява необходимата енергия в моменти на понижено производство. Съществуват литературни източници, в които се твърди, че съчетаването на този подход с прилагане на SMART GRID технологии и системите с изкуствен интелект, може да се реализира икономия на средства до 40%.

Най-разпространения начин за съхранение на ЕЕ, генерирана от PV системи, са електрическите батерии.

Батериите служат да натрупват излишната енергия, създадена от PV генератори, да я съхраняват за да се използват нощно време или когато няма друг енергиен източник. Батериите могат да се разреждат бързо и да отдават голямо количество енергия за кратко време. Основните видове батерии са оловно-киселинни, никел-кадмиеви, никел-хидридни, литиево-йонни и др. Все още най-често използваните батерии са оловно-киселинните с дълбок цикъл на разреждане. Биват два вида - „мокри“ и вентилно регулирани, като вторите изискват по-малка поддръжка[82].

Над 80% от използваните понастоящем батерии, включват оловна киселина (LA), оловен въглерод (LC), литиев ферофосфат (LFP) и никел, манган, кобалт (NMC), например при водните (проточни) батерии [26].

Внедряване на системи за измерване, наблюдение, мониторинг и управление на ФВС

Както всяка една техническа система, така и ФВС, по време на експлоатация, трябва да бъде диагностицирана, като за целта трябва да се измерват редица параметри и наблюдават различни режими на работа. Целта на мониторинга е да не се допускат грешки по време на работа на инсталацията и своевременно да се отстраняват повреди и аварии, регистрирани от системата за наблюдение [85].

Системите за мониторинг се състоят от сензори, датчици и измервателни средства, генериращи комуникационни протоколи и като надстройка на системата са алгоритмите за изследване и анализ на данните от измерванията.

Системите за мониторинг могат да бъдат създадени на база на статистически методи - теория на вероятността и теория на планиране на експеримента [115, 116,78]. Друг подход за създаване на прогресивни системи за диагностика на ФВС е със използване на постановките на изкуствения интелект [61], невронни мрежи [52, 81,95] и размита логика [56,66].

Архитектурата на една диагностична система на PV инсталация обикновено е изградена на три нива [53].

- първо ниво - сензори, мрежови анализатори и др.;
- второ ниво - събиране на данни и предварителна обработка;

трето ниво - извършва се анализ и оценка на PV характеристиките;

При второ ниво, системата за събиране и съхранение на данни е предназначена за наблюдение на генерацията и контрол на различни параметри. За трансфера на данни се използват жични, безжични и Power Line (по силовите кабели) комуникации.

- **Жична комуникация**

Най-опростения начин е чрез използване на коаксиални кабели със скорост на предаване на данни 10Gbps и ограничение в покритото разстояние. Често използвана комуникация е RS 232 или RS 485 с протокол MODBUS RTV, като ограничението по отношение на разстояние е по-голямо в сравнение с

безжичните комуникации. При комуникация по оптични кабели се покриват дълги разстояния със скорост на предаване на данни от (100÷200) Mbps, но тази технология е доста скъпа.

- **Безжична комуникация**

Много често срещан тип безжична комуникация се основава на GSM, като данните се предават чрез SMS, което осигурява високи скорости при големи обмени на данни. Услугата обаче доста скъпа. Висока скорост на предаване на данни се постига с GPRS устройства и комуникация. Радиочестотното предаване на данни е по-евтино средство за комуникация за райони без телефонно покритие, но за целта е необходимо разрешение за предаване. Друга безжична комуникация е така наречената WLAN мрежа (локална мрежа), която използва FTP протокол, покрива голяма площ и комуникира без ограничения. Недостатък на комуникацията е, че е с по-ниска честотна лента и по-ниско качество на услугата поради смущения.

- **Power Line комуникация (PLC)**

PLC превъзхожда по някои технически показатели редица други комуникационни системи като Zigbee, Bluetooth, Wi-Fi, RS485. При стабилна силова мрежа PLC може да достигне скорост на предаване на данни до 200 Mbps. Проблеми могат да възникнат тогава, когато мрежата е в лошо експлоатационно състояние.

Трето ниво на архитектурата на диагностичната система, свързано с анализ на данните и оценка на PV параметрите, се характеризира с използване на методите за моделиране и симулиране на процесите във ФВС, прилагане на вероятностно - статистически подходи за анализ, използване на софтуерни приложения, утвърждаване на съвременните постановки на изкуствения интелект, невронните мрежи, размита логика и др. Чрез анализа на данните трябва да бъдат оценени различни дефекти и аномалии при експлоатация на PV системите [53].

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ВТОРА ГЛАВА

1. *Направен е обстоен анализ на особеностите при проектиране, изграждане и експлоатация на ФВС. Систематизирана е актуална информация за различните технологии, съоръжения и елементи. Разгледано е приложението на фотоволтаичните системи за постигане на стабилна технико-икономическа ефективност, експлоатационна стабилност и сигурност. Всичко това е основание, потвърждение и гаранция за създаването на ефективен изследователски подход в настоящата разработка.*
2. *Направена е подробна категоризация на инверторите и батериите, като основно средство за съхранение на ЕЕ, като е анализирано тяхното развитие и усъвършенстване. Акцентирано е върху ролята на технологията за създаване на все по-добри в техническо и ценово отношение на тези основни компоненти на ФВС, а също така е направена прогноза за бъдещето при създаването на нови поколения инвертори, батерии и техните съпътстващи компоненти.*
3. *Направен е анализ на архитектурата и структурата на използваните системи за комуникация и тяхната категоризация. Маркирани са основните характеристики на базата за тяхното създаване, като са подчертани възможностите за нейното развитие с използване на прогресивни технологии в сферата на изкуствения интелект, невронни мрежи и размита логика.*

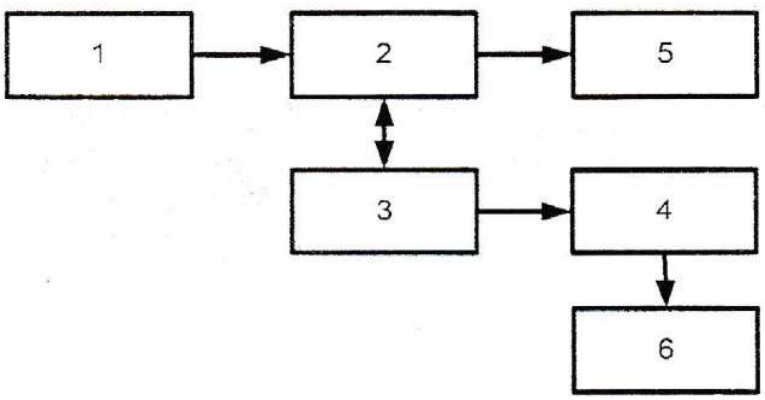
ТРЕТА ГЛАВА – Теоретично изследване за оценка на софтуерни приложения и методи за моделиране и симулиране при проектиране и изграждане на фотоволтаични системи

При фотоволтаичните генератори свързването на модули с различни електрически характеристики може да доведе до значителни загуби между

отделните компоненти, което води до загуба на мощност. Това означава, че изходната мощност на PV генератора е по-малка от сумата на мощностите на единичните модули, работещи при еднакви радиационни и температурни условия, което определя вътрешните загуби на PV системата [162]. Експерименталното изследване на фотоволтаичните елементи и системи е свързано със значителен разход на човешки труд и средства. Ето защо софтуерните приложения, математическото моделиране и симулиране се явява една добра алтернатива за извършване на многовариантни пресмятания с цел постигане на оптимални резултати. В течение на времето са разработени различни разновидности на електрически заместващи схеми и уравнения, описващи работата на PV клетка, модул и генератор, както и на редица други компоненти на фотоволтаичните системи.

Понастоящем се използват голям брой софтуерни продукти в областта на фотоволтаичните технологии за решаване на различни проблеми в сферата на проектирането на PV системи, оптимизиране на различни технически и технологични решения, рационализиране на режимни параметри при различни условия на експлоатация, оптимизиране на технико-икономически варианти и др. За решаването на тези задачи, изследователите трябва да имат информация за редица параметри и характеристики, свързани с географски и метеорологични фактори. Обикновено разработчиците на инженерните съоръжения, разполагат и ползват статистическа информация от база данни за локацията на обектите, за нивото на слънчевата радиация за съответния район и за географските и климатичните особености на местоположението.

Най-общо една PV система е изградена в съответствие с представената по-долу блокова схема (фиг. 3.1) и се състои от PV модули (1); контролер (2); батерии (3); инвертор (4); постояннотокови и променливо-токови потребители (5) и (6) [45].



Фиг. 3. 1 Блокова схема на автономна PV система

Така представената опростена схемотехническа постановка от Фиг. 3.1, предоставя пълни възможности за прилагане на оптимизационни процедури, моделиране и симулиране на всеки един елемент от тази схема. Такъв подход е необходимо да се приложи още в процеса на предпроектното проучване, да се утвърди през периода на проектиране и разшири по време на експлоатацията на съоръженията. За целта са разработени, създадени и ефективно се прилагат редица професионално изградени програмни продукти.

Разработване на оптимални режими на работа на ФВС чрез синтезиране на вероятностно статистически подход

В съответствие с приложението на иновативни технологии и експлоатация на ФВС, маркираните в т.1.3, е предложен иновативен подход, разработен на база на Теорията на планиране на експеримента (ТПЕ). Това е изключително ефективен метод от областта на теорията на вероятностите и математическата статистика, намиращ все по-голямо приложение в сферата на методите за оптимизация.

При приложението на ТПЕ съществуват две основни задачи [35]:

- Планиране на експеримента с цел получаване на математически модели;
- Планиране на експеримента с цел получаване на оптимални стойности на факторите;

СФ могат да заемат различни стойности, наречени нива. Въпреки, че в повечето случаи СФ са непрекъснати величини, то се приема, че заемат

определен брой дискретни нива. Всяка комбинация от различни нива на съществените фактори определя точно един от възможните опити, т.е. на всяка комбинация съответства точно една стойност на изходните параметри (ИП). Съвкупността от всички възможни комбинации на съществените фактори определя броя на възможните различни опити, например при m фактора, всеки от които варира на p нива, общия брой на възможните опити е pm. При редица планове е възможно да се получи математически модел без да се провеждат всички опити, а само точно определени комбинации. Това съществено улеснява провеждането на експеримента, а от друга страна е определящо за точността на различните провеждани типове експерименти.

При ТПЕ, обекта на изследване, изходните параметри и съществените фактори трябва да отговарят на следните изисквания.

Възпроизводимост. При многократно провеждане на експеримент при определени нива на съществените фактори, изходните параметри да се получават с еднаква статистическа зависимост. Върху възпроизводимостта влияние оказват смущаващите фактори.

Управляемост (при активен експеримент). Обекта трябва да е управляем, позволявайки активна намеса и въздействие на изследователя върху съществените фактори. Предпочита се процеса на оптимизация да се провежда по един изходен параметър (параметър на оптимизация).

Параметърът на оптимизация трябва да бъде количествено измерим, т.е. да има определени числови стойности. Възможно е ако не е такъв, да се използва ранговия подход;

Непрекъснатост и диференцируемост на функцията на отклика. В областта на изменение на факторите, функцията трябва да притежава само един екстремум.

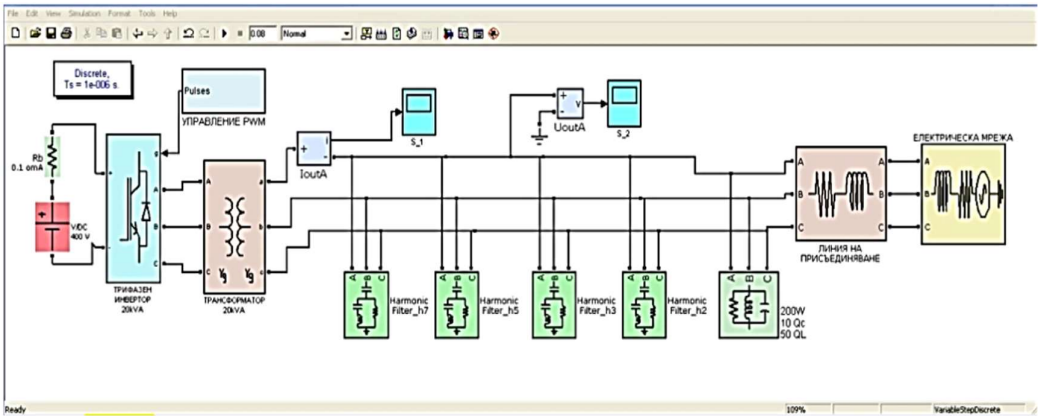
Размерността на факторното пространство се определя от броя на СФ, включени в съответния модел, а границите на изменение на факторите, определят интервала на определение на съответния фактор. Съответно на всяка точка от тази област съответства точка от повърхността на отклика.

Изисквания към СФ е те да бъдат управляеми, съвместими и независими. Съвместимостта означава реализирането на експеримент при различни нива и комбинации от фактори да е осъществимо и безопасно. Математическият модел описващ изследвания процес е приближение на функцията на отклика в тази част, в която факторите са определени или в цялата област. Математическите модели (ММ), получени с многофакторен подход, служат за изследване на зависимости между факторите и съответно за оптимизиране на режимите и процесите в обекта. Под оптимизиране се разбира определянето и установяването на такива значения на факторите, при които ще се постигне определена екстремална стойност (минимум или максимум) на целевата функция и съответно изходните параметри (параметри на оптимизация) ще имат оптимални нива. Определянето и установяването на оптимални стойности се извършва с отчитането на редица ограничения (отчитане на допълнителни условия за други изходни параметри, комбинации от СФ, отчитане на неуправляемите фактори и смущаващо въздействие).

Моделиране на ФВС в среда Simulink

Проведено е моделиране на PV система с малка мощност с цел облекчаване на изчислителните процедури и получаване на отчетливи резултати. В разглеждането е акцентирано върху процеси свързани с оценка на влиянието на качеството на ЕЕ и натоварването върху ЕМС и електроенергийната ефективност.

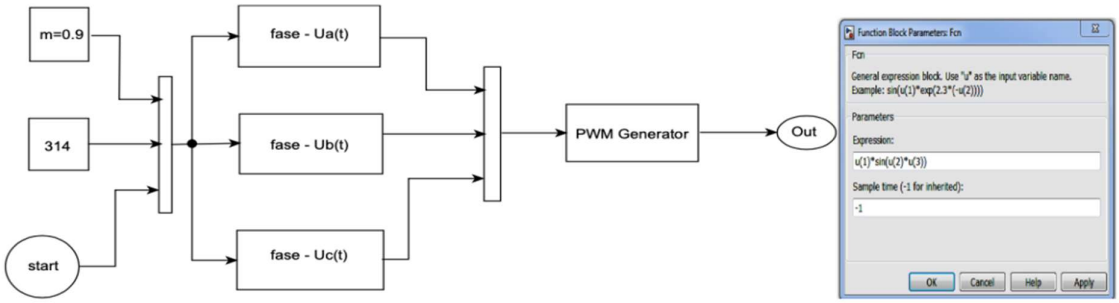
Архитектурата на виртуалната соларна система е представена на фиг.3.15. Тя е присъединена към захранващата мрежа на модел на СТ с мощност 30 KVA.



Фиг.3.15. Архитектура на виртуална PV система с включени пасивни филтри h_2, h_3, h_5 и h_7.

Моделът на инвертора е трифазен, настроен на същата мощност. В системата са предвидени пасивни филтри h_2, h_3, h_5 и h_7, за потискане нивото на в.х. Те са свързани към изхода на инвертора и минимизират хармоници с висока амплитуда, кратни на основни хармоник f_1. Представляват трептящ кръг, изграден от резистор R, бобина L и кондензатор C, работещи на резонансен принцип. Моделирането на процеса на измерване се извършва с виртуални прибори S_1 и S_2, които отчитат фазно напрежение и линеен ток на фаза A U_A и I_A. Методът на изчисление се базира на Фуриеров анализ. Моделът на спектралния анализатор (блок Powerui) изчислява амплитудните съставящи на амплитудно честотните характеристики (AUX) и интегралния коефициент на несинусоидалност THD за напрежението (THD_U) и за тока (THD_I), като използва фуриеровото преобразуване.

Съвременните инвертори са изградени с мощни транзистори, управлявани на принципа на Широчинно-импулсната модулация (ШИМ). Този метод е с най-висок к.п.д. (η = 90÷98%), но основен недостатък при него е влошената EMC, свързана с генериране на в.х. в системата. Моделирането на ШИМ в архитектурата на инверторната система при изходна мощност 2000W става с блок “PWM Generator от фиг.3.16.



Фиг.3.16. Моделиране на ШИМ в архитектурата на PV система с блок "PWM Generator"

Изчисляването на пасивните филтри се извършва при условие, че те работят с честота определена от собствената (резонансна честота) f_O с помощта на израза:

$$\mathbf{f_0 = \frac{1}{2\Pi . \sqrt{L.C}}} \qquad \mathbf{(3.13)}$$

Качественият фактор Q на честотния филтър се определя от израза:

$$\mathbf{Q = \frac{f_0}{f_7 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f}} \qquad \mathbf{(3.14)}$$

където: Δf - честотна лента на пропускане на филтъра.

Активната P, индуктивната Q_L, капацитивната Q_C и пълната мощност на филтъра S се определят от изразите:

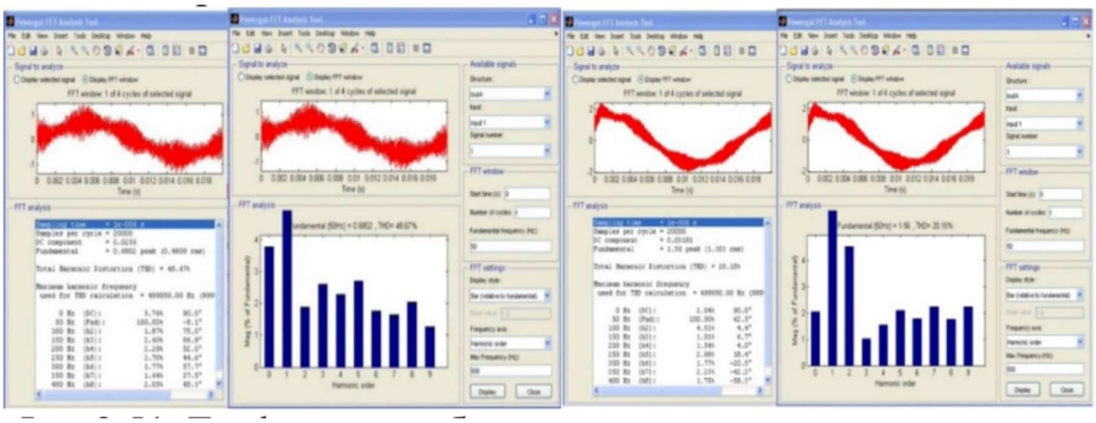
$$P = R.I^2[W]; Q_L = X_L.I^2[VAr]; Q_C = X_C.I^2[VAr]; S^2 = P^2 + Q^2 + D^2[VA]$$

където: D - деформационна мощност, формирана от действието на нелинейните елементи в системата.

Проведено е симулиране на следните режими на работа:

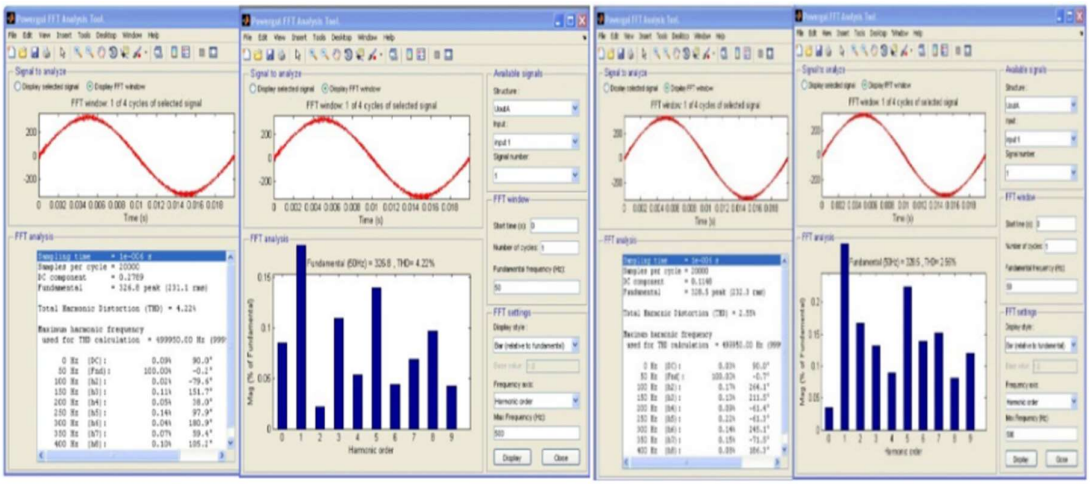
- *Режим на работа при минимален симетричен товар - P = 200W; Q_C = 10 VAr; Q_L = 50 VAr.*

Изходния ток I_A след моделирането е представен в графичен и табличен вид на фиг.3.17.



Фиг. 3.17. Графични и таблични резултати при товар 200W за I_A без филтри вляво и I_A с филтриране вдясно (включени h_2, h_3, h_5 и h_7).

Отчетени са стойности за I_A= 0,48 A; THD_I = 48,67% без филтри и I_A=1,1[A]; THD_I = 20,15% с включени филтри, което показва добрия ефект от филтрирането. Резултатите за изходното напрежение U_A са показани на фиг.3.18. като отчетените стойности без филтриране са U_A = 231,6 [V]; THD_I =7,18 % и след филтриране U_A = 233,1 [V] и THD_I =2,73 %, което потвърждава направения извод.

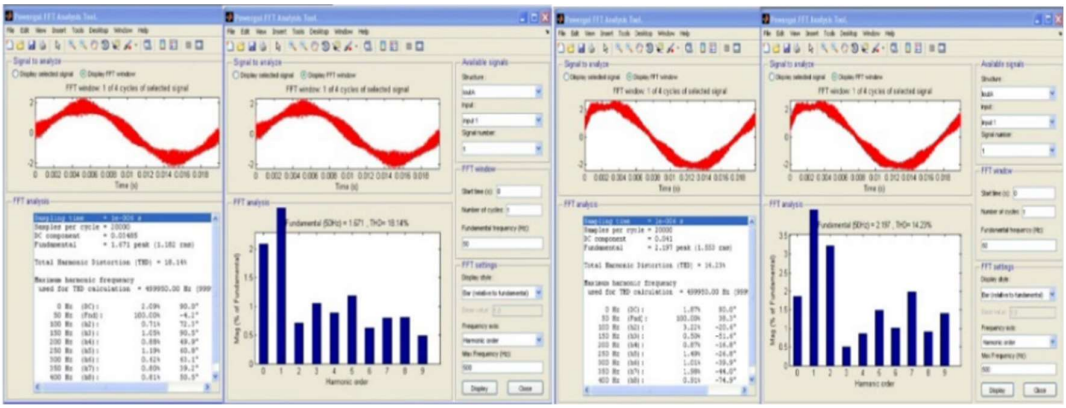


Фиг.3.18. Графични и таблични резултати при товар 200W за V_A без филтри (вляво) и добавени филтри (вдясно)

- *Режим на работа със симетричен товар и междинно натоварване P = 800W; Q_C = 10VAr; Q_L = 50VAr.*

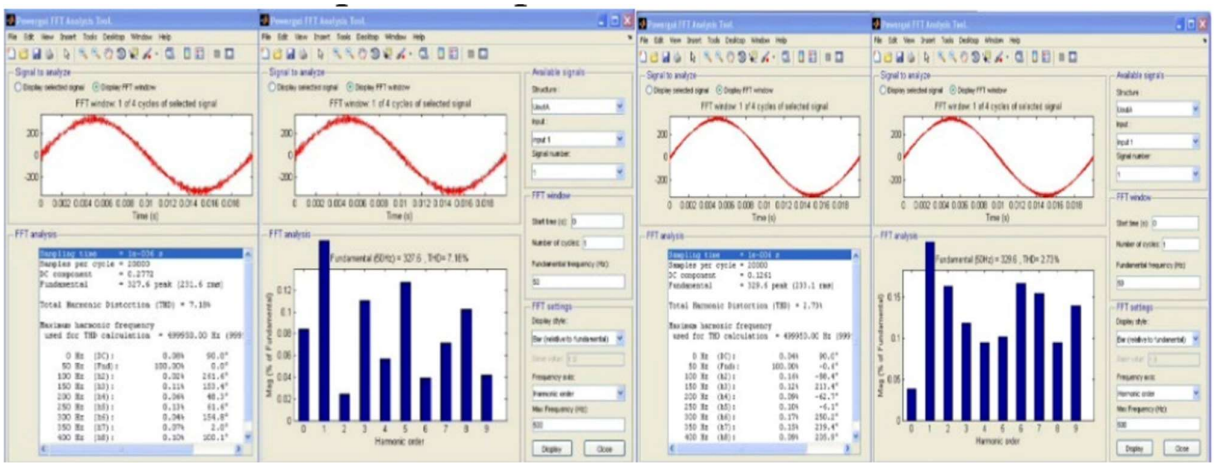
Токът I_A без прилагане на филтриране има стойност I_A = 1,2 A и хармоничен състав, оценен на THD_I = 18,14%. След включването на пасивните

филтри, токът се повишава до стойност I_A = 1,5 A, спектралния състав се намалява и THD_I = 14,23%. Освен това е видно, че с подобряване на натоварването, т.е. повишаване на P, се наблюдава аналогичен процес на подобряване качеството на I_A (фиг.3.19)



Фиг.3.19. Графични и таблични резултати при товар 800 W за I_A без филтри (вляво) и след филтриране (вдясно)

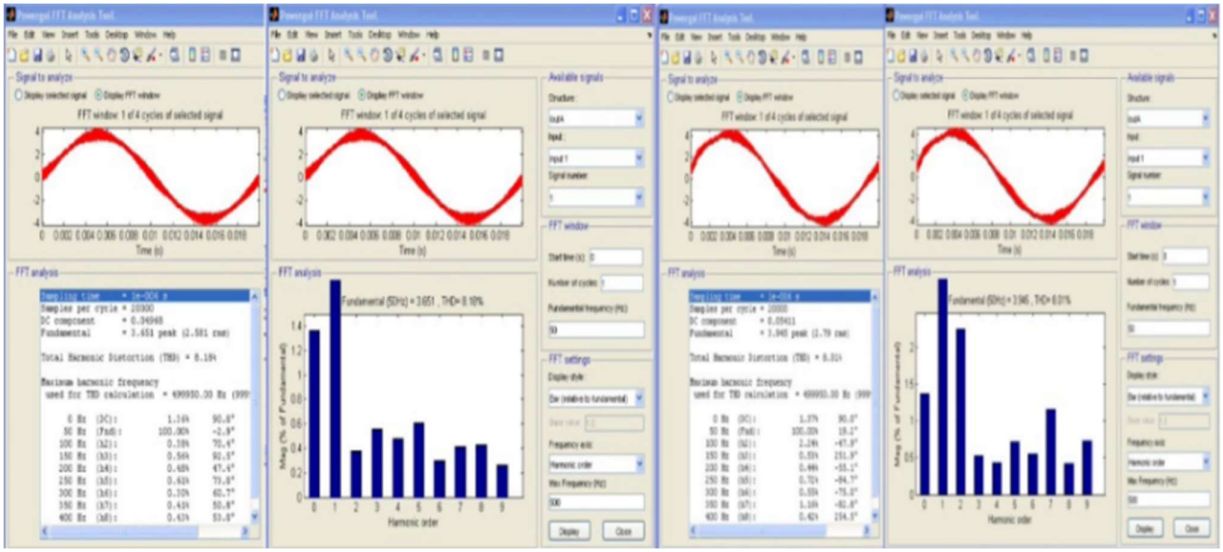
Диаграми, хистограми и таблични данни за U_A (фиг.3.20) отчитат стойности без филтриране U_A = 231 V и THD_U = 4,22% и след филтриране U_A= 232 V и THD_U = 2,55%. Регистрира се известно по-слабо от предния режим подобряване на качеството на ЕЕ, респективно ЕМС.



Фиг.3.20. Графични и таблични резултати при товар 800W за U_A без филтри (вляво) и добавени филтри (вдясно)

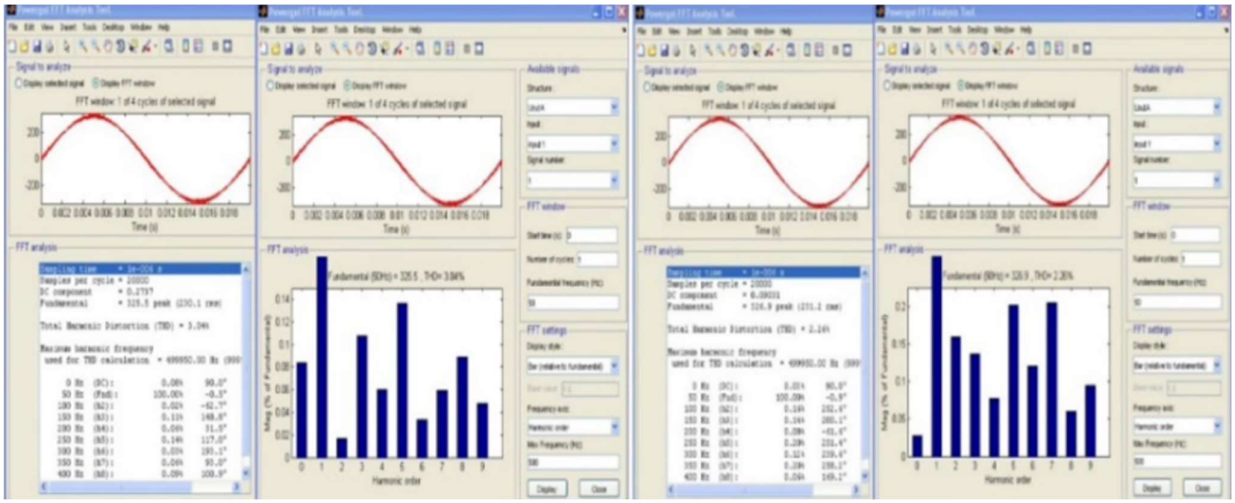
- *Режим на работа при максимален симетричен товар P = 2000 W; Q_C = 10VAr; Q_L = 50VAr.*

На фиг.3.21 са показани диаграми, хистограми и таблични данни за тока I_A без филтриране I_A = 2,6 A, със спектрален състав THD_I = 8,18% и след филтриране I_A = 2,7 A и THD_I = 8,01%. Регистрираното намаление е несъществено, т.к. се работи с номинални параметри на инсталацията.



Фиг.3.21 Графични и таблични резултати при товар 2000 W за I_A без филтри (вляво) и с включени филтри (вдясно)

За изходното напрежение U_A се получават стойностите U_A = 230 V и THD_U = 3,04 % без включени филтри и U_A = 231 V; THD_U = 2,26 % след филтриране, т.е. отново ефекта на филтриране е незначителен (фиг.3.22)



Фиг.3.22. Графични и таблични резултати при товар 2000 W за U_A без филтри (вляво) и с добавени филтри (вдясно)

Обобщените резултати от симулирането са представени в табл.3.2.

Табл. 3.2. Обобщени резултати от изследването

Режим на натоварване	I_L [A]	THD_I[%]	U_L[V]	THD_U[%]
Минимална активна мощност P = 200 W				
Без филтри	0,48	48,67	231,6	7,18
С филтри h_2, h_3, h_5 и h_7	**1,1**	**20,15**	**233,1**	**2,73**
Средна активна мощност P = 800 W				
Без филтри	1,2	18,14	231	4,22
С филтри h_2, h_3, h_5 и h_7	**1,5**	**14,2**	**232**	**2,55**
Повишена активна мощност P = 2000 W				
Без филтри	2,6	8,18	230	3,04
С филтри h_2, h_3, h_5 и h_7	**2,7**	**8,01**	**231**	**2,26**

Анализа на резултатите дава възможност да се направят следните изводи:

- Изследванията потвърждават, че при понижено натоварване, филтрите работят по-ефективно:
- При минимално натоварване, кривите на тока I_A е силно деформирана и в симулационния модел се генерират в.х., влияещи негативно на работата на редица устройства и съоръжения;
- При всички изследвания се потвърждава в пълна степен, че включеният в модела на инвертора на трифазен RLC филтър потиска нелинейността във формата на кривата на I_A и намалява THD_I;
- Потвърждава се от допълнителни изследвания, че при ниски натоварвания СТ работи в нелинейната част от характеристиката си, с висок процент от хармоници и нисък фактор на мощността. Той е със схема на свързване Y/Δ, която потиска трети хармоник, но топлинните загуби от хистерезис и вихрови токове се повишават а също се повишава и реактивната съставка на тока в първичната верига;
- Изследванията доказват, че с помощта на създадения модел на PV инсталация, може да се разработи реална фотоволтаична система с добри показатели и характеристики, в съответствие с резултатите от проведеното моделиране и симулиране.

Могат да се направят следните препоръки за реализиране на ФВС при реални експлоатационни условия:

- Препоръчва се постигане на номиналните параметри на работа на инверторите. Този режим осигурява работа в линейната област на характеристиките на силовите елементи и постигане на висок фактор на мощността.
- При евентуално претоварване на инвертора, се понижава изходното напрежение и обменът на ЕЕ се преобръща от мрежата към консуматорите и следва автоматично изключване на инвертора. При това е възможно да настъпят резонансни явления, пренапрежения и свръхтокове по кабелите на ел. мрежата в точката на присъединяване.
- Препоръчва се при реализацията на реални ФВС, използването на пасивни филтри, които потискат хармониците с малки номера и големи амплитуди, с което се подобрява формата на кривата на тока и напрежението. Този подход има ефект и несиметриране в трифазната система, като по този начин се намалява тока в неутралните проводници;
- Препоръчва се също така да се извършват и някои практични схемотехнически решения, като например разделяне на кабелната конфигурация на две категории - за захранване на чувствителни и нечувствителни към в.х. потребители. Това би ограничило съществено влиянието на хармониците в захранващата мрежа
- За създаване на малък импеданс и по-лесно шунтиране и филтриране на хармониците на тока и напрежението, се препоръчва изграждане на заземителни инсталации с многоконтурно заземяване.

Съвременен високоефективен метод за подобряване на качеството на ЕЕ е прилагането на активни филтри, които могат да осигурят, минимизиране на спектралния състав на тока и напрежението, компенсация на реактивните съставящи на мощността, подобряване на несиметричните режими, постигане на висок фактор на мощността и др. Възможно и целесъобразно е използването им в съчетание с пасивни филтри от паралелен и последователен тип.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА

1. Разработена е математическа постановка, представляваща комплексен многофакторен подход във вероятностно-статистическа среда, с използване на Теорията на планиране на експеримента (ТПЕ). В много факторно пространство са дефинирани редица планове, като въз основа на направен статистически анализ, за провеждане на експериментална дейност в работата е предложен план B_4, притежаващ високи стахостични достойнства.

2. Направен е обобщен анализ на софтуерни продукти, използвани при проектиране и експлоатация на ФВС. В практично-приложен аспект са показани възможности за използване на технологични продукти като DSS и SCADA при проектиране и управление на PV инсталации. Обоснована е възможността и целесъобразността от използването на MatLab-Simulink при моделиране и симулиране на процесите при PV системите и се препоръчва използването му в това изследване.

3. Представена е теоретична постановка за анализ на електрическите характеристики на фотоволтаичния генератор на базата на еднодиодна схема на PV модул. Синтезирани са математически модели на фотоволтаични клетки в общ вид при стандартни условия на изпитване, а също и при изменение на слънчевата радиация, засенчването и динамиката на температурния режим. Моделирането дава възможност за определяне на основните електрически параметри и характеристики на PV модулите - волтамперните и мощностни характеристики, представени в графичен и аналитичен вид, адаптирани за използване в среда MathCAD.

4. Предложена е оригинална, нестандартна постановка за симулация на работата на синтезирана PV система, свързана към мрежата в среда MathLab-Simulink. Всички изследвания, проведени при различни режими на работа, доказват в пълна степен, че включените в модела на инвертора RLC филтри, подтискат нелинейността във формата на кривата на тока и намаляват THD_I, като този ефект е по-голям при по-ниско натоварване.

Резултатите от изследването потвърждават, че на база на създадения модел може да се разработи реална фотоволтаична система с добри показатели и характеристики, съответстващи на синтезираните от проведената виртуална симулация.

5. Потвърдено е, че моделирането на акумулаторни батерии е сложно, поради влиянието на много механизми и процеси. Приложен е квазистатичен SOC модел с използване на множество емпирични методи, оценяващ степента на заряд на оловно-киселинните батерии. Проведено е моделиране на тока и напрежението на заряд и разряд, както и на капацитета на батерията в среда LabVIEW. Измерванията се проведат с помощта на DAQ карта на ф. National Instruments, като се извършва и допълнителна обработка в среда на MS Excel.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА – Експериментални изследвания на реални фотоволтаични системи и препоръки за рационализиране и оптимизиране.

Мощността на ФВС в страната непрекъснато нараства и понастоящем те са основна част от електроенергийната ни система. Намаляване на производителността на PV системите и влошаването на КПД по време на експлоатация е един от съществените недостатъци на тези ВЕИ. Стареенето на модулите и негативното влияние на редица фактори върху процеса на генерация на ЕЕ е необходимо непрекъснато да се контролира и анализира.

В [29] и [30] е проведено няколко годишно изследване на ефективността на PV панели. Методиката на изследване се базира на определяне на общия к. п. д $\boldsymbol{\eta}$ на производството на ЕЕ, включващ влиянието на PV модули и управляващите инвертори, изчислен по формулата:

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{\mathrm{E}}{\int_{\mathbf{t}} \mathbf{G}.\mathbf{A}.\mathbf{dt}}.\mathbf{100}\ [\%]$$

където: генерирана ЕЕ от PV системата за време t; G- интензитет на слънчевата радиация, паднала върху панелите, W/m^2; A-площта на PV панелите, m^2;

Интензитетът на слънчевата радиация G се измерва от метеостанция Sunny Sensor Box (SSB) на немската SMA, който има обхват (0÷1500) W/m^2 с разрешителна способност 1 W/m^2 при точност на измерването ± 8%.

Проведените изследвания показват, че средномесечната стойност на коефициента на полезно действие за пет годишния период, намалява с около 0, 37%. За 25 годишен период, колкото е средния живот на PV панелите, следвайки същия закон на изменение, **η** ще се понижи с около 10%, което предположение има теоретичен характер.

Направеното разглеждане обосновава необходимостта от задълбочено изследване на работа на действащи ФВС с цел анализиране на състоянието на фотоволтаичната енергетика и набелязване на мерки за подобряването им. В тази връзка са подбрани 3 на брой подходящи и достъпни ФЕЦ от различни региони на страната с мощности в диапазона 400 kWp до 20 MWp, с различни характеристики и режимни параметри, за които е проведено научно-обосновано изследване.

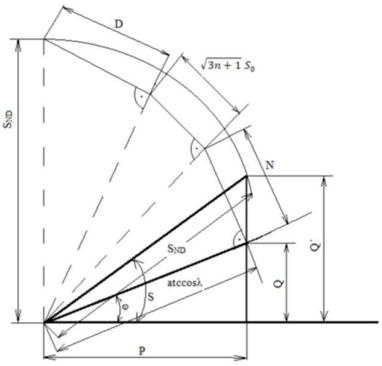
Методическа постановка, използвана в процеса на изследване

За провеждане на изследователския процес е предложена теоретична постановка, която е приложима за всички нива на ЕЕС, както и за всички групи потребители, а също и за различните генериращи източници. Методиката е синтезирана, научно-обоснована и адаптирана за практическа реализация и универсално приложение от големия чешки изследовател проф. Ричард Дрехслер [15]. За състоянието й той използва богат изследователски и теоретичен материал от трудовете на редица учени по проблемите на качеството на ЕЕ [16,18, 19]. Методиката се базира на разработване на диференциран подход за определяне на различните субстанции на мощността. Пълната действителна мощност $S_д$ се представя в съответствие с фиг.4.3 и израза [1,15]:

$$\mathbf{S_д = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + (3n + 1)S_0^2 + D^2}} \quad \textbf{(4.1)}$$

където: P, Q, N, S_0 и D - са съответно активна, реактивна, пулсираща, скрита и деформационна мощности; n - коефициент, показващ колко пъти съпротивлението на неутралния проводник е по-голямо от съпротивлението на фазните проводници. Методиката използва метода на несиметричните съставки, представени по-долу. Симетричните съставки на тока и напрежението на правата (U_1, I_1), обратната (U_2,I_2) и нулевата последователност (U_0, I_0) се определят от изразите:

$$\mathbf{\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a\dot{U}_b + a^2\dot{U}_c);\ \ \dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c);\ \ \dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c)}$$
$$\mathbf{\dot{I}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c);\ \ \dot{I}_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c);\ \ \dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c)} \quad \textbf{(4.2)}$$



Фиг.4.3 Съставящи на $S_д$

където: U_a, U_b, U_c са фазните напрежения; a = $e^{j2\pi/3} = e^{j120} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ - оператор на Щайнменц.

Фактора на мощността PF се определя от израза [15]:

$$\mathbf{PF = \frac{P}{S_д} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+N^2+(3n+1)S_0^2+D^2}} =} \quad \textbf{(4.11)}$$
$$\mathbf{\cos\varphi\sqrt{\frac{1-k_H^2}{1+\varepsilon_I^2+(3n+1)\alpha_I^2}}}$$

Ако се въведе обобщен коефициент на несиметрия и неуравновесеност ε:

$$\mathbf{\varepsilon^2 = \varepsilon_I^2 + (3n + 1)\alpha_I^2} \quad \textbf{(4.12)}$$

то (4.11) се опростява и придобива вида:

$$\mathbf{k_m = \cos\varphi\sqrt{\frac{1-k_H^2}{1+\varepsilon^2}}} \quad \textbf{(4.13)}$$

където: q – коефициент на деформирано електропотребление, характеризиращ резултатното влияние на висшите хармоници, несиметрията и неуравновесеността на токовете.

Загубите на активна мощност ΔP в система с несиметрични и несинусоидални токове, се определят от израза [15]:

$$\Delta P \approx \frac{1}{PF} = \frac{1}{P^2}.[P^2 + Q^2 + N^2 + (3n+1).S_0^2 + D^2] \quad (4.14)$$

Оптимално електропотребление на активна мощност P имаме при напълно симетричен и синусоидален режим и без предаване на реактивна мощност, т.е. когато Q=0; $\cos\varphi = 1; N = 0; \varepsilon_I = 0; S_0 = 0; \alpha_I = 0; D = 0; k_И = 0$. Тогава израза (4.14) придобива вида:

$$\Delta P_{мин} = \frac{P^2}{P^2}.100 = 100 \quad (4.15)$$

Анализът на израза (4.14) дава възможност да се дефинират следните парциални загуби на активна мощност:

$$\left.\begin{array}{l} \text{парциална част на загубите от реактивна мощност } \Delta P_Q = \frac{Q^2}{P^2}.100[\%] \\ \text{парциална част на загубите от пулсираща мощност } \Delta P_N = \frac{N^2}{P^2}.100[\%] \\ \text{парциална част на загубите от скрита мощност } \Delta P_{So} = \frac{S_0^2}{P^2}.100[\%] \\ \text{парциална част на загубите от деформ. мощност } \Delta P_D = \frac{D^2}{P^2}.100[\%] \end{array}\right\} \quad (4.16)$$

Графична интерпретация на част от резултатите от мрежови анализатори, е представена по-долу.

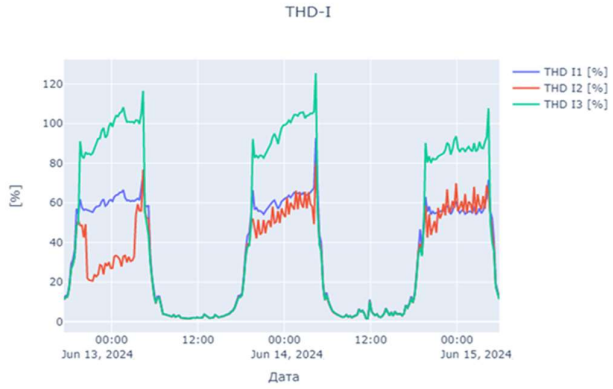
Част от измерванията за електроенергетичните показатели

Фиг. 4. 11. Мощности и фактор на мощността

Фиг. 4. 13. Пълна мощност

Фиг. 4. 14. Реактивна мощност

Фиг. 4. 16. Хармоници в тока



Фиг. 4. 16. THD-1

Обобщен анализ на изследователския процес и предложение за рационализиране и оптимизиране на режима на работа

Във времето на експлоатация, изследваните ФЕЦ работят с различни режими на работа и регистрират някои прекъсвания, изключвания, влошена генерация, повреди, аварийни състояния и други различни аномалии. Тези негативни явления могат да бъдат структурирани в три основни групи, разгледани по-долу:

1. **Технически дефекти и повреди**

Повредите в инверторите са най-честите причини за изключване на PV системите. Основните причини за аварирането им са дефекти и повреди в електронните компоненти, в микропроцесорните чипове, електронните защити и механични повреди. Заедно с външни причини (мъгла, влага, дъжд)

се установява, че около (65÷70) % от повредите в изследваните PV инсталации се дължат на инверторите. Установи се също, че в болшинството от изследваните ФЕЦ, използваните стрингови инвертори не са от най-добър клас, произведени са от китайски фирми с параметри, неотговарящи на каталожните данни.

В няколко PV системи са регистрирани увреждания на инвертори от влага - най-често мъгли, т.к. обектите са разположени в котловини. Беше препоръчано на операторите на PV централите да вземат мерки за тяхното по-добро обезопасяване и изолиране от влага. Регистрирани са случаи и на повреди на инвертори от високи температури при разположени инсталации в най-южните райони на страната. При нагрявания по-високи от 50°C, електронните и силовите елементи на инвертора влошават своите параметри и това е причината за настъпилите повреди.

Регистрирани са и няколко случая на повредени байпас и блокинг диоди. Дефектиралите байпас диоди са вследствие на засенчване, в резултат на което се предизвиква протичане на ток от съседните клетки. Всъщност този елемент от генератор става консуматор, има малко съпротивление, прегрява се, дефектира и прекъсва веригата. Блокинг диодите предпазват от обратен ток батериите или мрежовото захранване. Регистрираната повреда на блокинг диода позволява да тече енергия в обратна посока - от батерията или от мрежата, вследствие на което рязко намалява добива от PV системата (с около 60% според експертен анализ) и се получава прегряване на PV елементите.

Наблюдавани са неизправности в съединителните кутии, които са довели дори до изключвана на PV генератора от централния инвертор. Основна причина за тези повреди са лош монтаж и влага. Такива са причините и за възникване на частични к.с. в две от изследваните централи, предизвикали съществено намаляване на мощността и добива на ЕЕ.

Установено е, че някои от изследваните централи работят ефективно, с добри енергийни показатели, с намален период на експлоатация в рамките на

(150÷160) дни в годината поради различни организационни и технически причини. При слънчева радиация по-голяма от 0,4 kW/m^2 за разглежданите централи, би следвало, те да работят ефективно не по-малко от (190÷200) дни в годината. Понижената използваемост на PV инсталацията означава неусвояемост на ресурса на слънчевото греене и по-нисък годишен добив и производителност. Като резултат от изследването, са анализирани причините на това несъответствие, формулирани са мерки за отстраняването му и е препоръчано на операторите да спазват предложената методика за правилна експлоатация на централата.

Експлоатационни фактори, предизвикващи аномалии и влошаване на състоянието на PV съоръженията.

При високи температури, в границите (36÷40)°C, характерни за южна България, при няколко PV инсталации е регистрирано намаляване на генерираната мощност средно с около 4,5%. Причина за това е намаляването на напрежението и тока на PV модулите при по-високи температури, респективно капацитета на клетката да генерира ЕЕ. Всъщност електрическата проводимост на фотоклетките, при високи температури се намалява и от там се намалява способността й да преобразува светлинната енергия в електрическа. Аналогични случаи на намаляване на мощността, но при ниски температури, са регистрирани при експлоатацията на три от изследваните инсталации. При високи нива на слънчева радиация, ясно безоблачно небе и слаб вятър, температури в границата (1÷5)°C и снежна покривка върху част от PV модулите е регистрирано понижение на мощността с (8÷19)%. При по-ниски температури е известно, че напрежението на соларните панели се увеличава, но при токът тази зависимост е напълно обратна, той се намалява с това се намалява и генерираната от инсталацията мощност. Влияние върху този негативен ефект в случая оказват и други фактори като замърсяване, снежна покривка и др. Замърсяването от прах, полени, листа, клонки, изпражнения на птици и др., според литературни проучвания, могат да причинят намаляване на

ефективността (мощността) на PV системите в границите (7÷50)%. Известно е, че през зимата замърсяването е по-голямо, тъй като мръсния студен въздух се отлага ниско долу до земята. На операторите на централите е препоръчано, почистването на повърхността на панелите да се извършва през пролетта, когато е по-хладно, а не през лятото - рано сутрин или привечер. През лятото повърхността на панелите е нагрята и не е правилно да се извършват такива манипулации. Наличието на снежна покривка намалява достъпа на светлината до панелите и от там се намалява генерираната ЕЕ. В конкретния случай не е приложено отстраняване на снега и почистване на мръсотията. Беше препоръчано също така на мениджърите на ФВЦ да използват технологията с антизамръзващи покрития, с което се постига и подобряване на прозрачността на покритието на модулите. Наслоения прах върху панелите и мръсните петна се препоръчва в конкретния случай да се почистват с вода, с помощта на мека, недраскаща четка или гъба. За по-мощните PV инсталации (над 10 MWp) е препоръчана на експлоататорите иновативна технология с използване на сензори, монтирани на панелите, които използват LED светлинна индикация за измерването на слоя натрупана мръсотия, откъдето се определя и момента за предприемане на почистване.

Изследваните ФЕЦ-ве не винаги работят с оптимални параметри. Анализът показва, че по време на тяхната експлоатация, редица фактори, някои от които споменати по-горе, оказват негативно влияние върху генерираната мощност. Освен влиянието на температурата, анализирано по-горе, могат да се посочат редица причини за влошаване на генерацията, наблюдавани във времето на изследователския процес:

- Замърсяване и засенчване - регистрираните случаи са със реагенти прах, полени, листа, изпражнения от птици, мъгла, дървета и сгради. При засенчване и повредени байпасни диоди в два от случаите, се предизвикват високи температури, възникване на т.н. горещи точки в PV модула, прекъсване на електрическите връзки и изгаряне на клетката;

- Корозия на елементи от PV модула - вследствие на проникване на влага, кородират метални части, понижава се изолационното ниво, протичат токове на утечка и се намалява генерираната мощност. Наблюдава се във всички изследвани ФЕЦ.
- Разслояване и обезцветяване на PV модулите - при високи температури и висока влажност, се натрупват соли, особено силно при морски зони, които предизвикват този негативен ефект. Констатиран е с помощта на измерване с термовизионна инфрачервена камера тип FLIR във няколко от изследваните обекти.
- Потенциално индуцирана деградация PID в конткретните изследвания е установена в три от изследваните ФЕЦ и е причинена от продължително високо напрежение върху модулите в един от случаите; от лошо заземяване, свързано с поява на блуждаещи токове и в.х. във втория случай и в третия случай, смесен от първите два плюс високи температури.
- Светлинно иднуцирана деградация - LID е предизвикано от физическата реакция на модула към светлината, в най-силна степен се проявява при първоначално включване и при всяко следващо включване на PV системата. Съществува при всички PV инсталации, проявява се и в конкретното изследване.

Въз основа на направеното по горе проучване при тази втора група влияещи върху експлоатацията на PV системите фактори, е направен опит за тяхното систематизиране. За целта е определено дяловото участие на различните фактори върху изменението на мощността на PV инсталациите, представено в % в табл. 4.7.

Табл.4.7. Дялово участие на различни фактори върху изменението на мощността

ВЛИЯЕЩИ ФАКТОРИ						
	Влияние на температурата	Замърсяване и засенчване	Корозия на мет. елементи	Разслояване и обезцветяване	PID	LID
Дялово участие[%]	24,7	18,4	21,4	16,7	14,6	4,2

Влияние на електроенергийни показатели върху мощността и добива на ФЕЦ

Във всяка ЕСС съществуват показатели, свързани с количествени електроенергийни характеристики от една страна и от друга с характеристики, свързани с качеството на ЕЕ. Основен количествен електроенергиен показател е фактора на мощността (PF), но съществуват и редица показатели и бездименионни величини, които определят режимите на работа и ефективността на съоръженията. PV съоръженията, като част от ЕСС, се подчиняват на всички изисквания, норми и стандарти, свързани с качеството на ЕЕ и електромагнитна съвместимост (ЕМС). Проведените изследвания дават възможност да се направи анализ на различни режими на работа на ФЕЦ. За целта са направени три извадки за три нива на натоварване на централите: β_1 = (0, 3÷0, 5); β_2 = (0, 5÷0, 7); β_3 = (0, 7÷1).

Табл.4.8. Резултати от изследването

Натоварване на централите	Изменение на изследваните показатели в %				
β_1=0,3÷0,5	δ_U	ε_U	α_U	ε_I	α_I
	-2,2÷2,4	1,15÷2,81	0,62÷1,55	2,34÷4,75	1,63÷2,37
	THD_U	THD_I	ΔP_N	ΔP_{So}	ΔP_D
	3,87÷11,34	5,6÷18,34	1,27÷1,89	0,49÷1,18	1,55÷3,94
β_2=0,5÷0,7	δ_U	ε_U	α_U	ε_I	α_I
	-1,8÷2,9	1,02÷1,96	0,47÷1,05	1,89÷3,27	1,35÷1,96
	THD_U	THD_I	ΔP_N	ΔP_{So}	ΔP_D
	2,32÷6,38	3,27÷13,08	1,03÷1,58	0,31÷0,85	1,24÷2,79
β_3=0,7÷1	δ_U	ε_U	α_U	ε_I	α_I
	-1,5÷4,3	0,94÷1,37	0,29÷0,58	1,17÷2,34	0,67÷1,23
	THD_U	THD_I	ΔP_N	ΔP_{So}	ΔP_D
	2,08÷4,52	2,85÷9,63	0,85÷1,34	0,27÷0,59	1,02÷1,83

Изследваните показатели са групирани в две групи - ПКЕЕ и загуби на мощност от влошени ПКЕЕ. Към първата група спадат показатели, дефинирани в табл. 4.8: δ_U, ε_U, α_U, ε_I, α_I, THD_U, THD_I. Във втора група са включени загубите на активна мощност, подробно разгледани в методиката, представени в т. 4.1 : ΔP_N (загуби от пулсираща мощност); ΔP_{So} (загуби от скрита мощност); ΔP_D (загуби от деформационна мощност). В табл. 4.8. са представени получените резултати. Анализа на резултатите показва следното:

- Изследваните ПКЕЕ се изменят в доста широки граници : $\delta_U = (2{,}2 \div 4{,}3)$ %; $\varepsilon_U = (0{,}94 \div 2{,}81)$ %; $\alpha_U = (0{,}29 \div 1{,}55)$ %; $\varepsilon_I = (1{,}17 \div 4{,}75)$ %; $\alpha_I = (0{,}67 \div 2{,}37)$ %; $THD_U = (2{,}85 \div 11{,}34)$ %; $THD_I = (2{,}85 \div 18{,}34)$ %. Тези стойности много често са по-големи от регламентираните в страната нормативни изисквания. Това означава, че генерираната от PV централите ЕЕ не винаги е с добро качество и може да предизвика електромагнитна несъвместимост с приемащата мрежа.
- Установено е генериране на в.х. на напрежението и тока, оценено с помощта на THD_U и THD_I. Това се дължи на многобройните линейни елементи, вградени във всяка PV инсталация - контролери, инвертори, диоди и мн. други. По време на изследванията дори са регистрирани два случая в които самите инвертори, работещи в условията на високи нива на в.х., се държат неадекватно и реагират неправилно. Деформацията на формата на кривата на тока и напрежението, което е несъвместимо с функцията и предназначението на инверторите, е предпоставка и условие, за някои от централите да се препоръча прилагане на филтриране с помощта на пасивни филтри.
- Регистрирани са и не малки нива на несиметрия и неуравновесеност на напрежението и тока, оценени с помощта на коефициентите ε_U, ε_I, α_U и α_I. Това най-вероятно и основно се дължи на т.н. “случайна несиметрия”, създаваща този дисбаланс. В конкретните случаи, в които се наблюдава тази негативна ситуация, е необходимо да се проведат допълнителни изследвания за постигане на пълна яснота по проблема.

● Резултатите от изследванията показват, че всички изследвани показатели при понижено натоварване β_1=0,3÷0,5 имат значително по-високи стойности в сравнение с тези при високо натоварване β_3=0,7÷1, с генерация на ЕЕ близо до номиналната. Следователно, ниското натоварване, т.е. понижената генерация на ЕЕ има негативен отпечатък върху експлоатационните характеристики на ФЕЦ. Поради тези причини е от съществено значение PV инсталациите да работят с параметри, близки до номиналните и в точката на максималната мощност (MPPT).

Въз основа на направения анализ може да се приеме, че средната стойност на PF за представителното множество от изследвани ФЕЦ е следната :

PF = 0,87 ÷ 0,88

Тази стойност на PF определено може да се приеме като незадоволителна за осигуряване на оптимални режими на експлоатация на анализираните PV системи.

Оптимизиране на ФВС чрез прилагане на комплексен многофакторен подход

ФВС са съвкупност от разнообразни по своя характер електротехнически компоненти, работещи с различни параметри и режими на работа, но обединени в обща платформа с целева функция "постигане на висок добив на ЕЕ, респективно висока електроенергийна ефективност". Върху целевата функция или ИП (параметър на оптимизация), въздействат редица фактори, много често в различни посоки, които оказват различен ефект и влияние върху ИП. Следователно може да се дефинира едно многофакторно пространство със сложни и нееднозначни връзки между отделните СФ, влияещи по определен начин във формализован вид и организиран като математическа структура, най-адекватно, систематично и точно с помощта на ТПЕ, основните теоретични положения, на която са представени в т.1.6. от първа глава на дисертационната работа. ТПЕ дава възможност да се получат математически модел за изследваните ИП в зависимост от определените СФ.

При ПЕ от II порядък, математическия модел представляват квадратични формализации, с които по-пълно и точно се описват зависимостите между ИП и СФ. В настоящото изследване е приложен пълен факторен експеримент от II порядък с използване на план Bm, който има много добри статистически свойства [2,4, 5, 35]. За план Bm с четири СФ (m = 4) и ИП У, математическия модел се записва във вида (виж формула 1.21.):

$$\mathbf{Y = b_0 + b_1.x_1 + b_2.x_2 + b_3.x_3 + b_4.x_4} \qquad \textbf{(4.19)}$$
$$\mathbf{+ b_{12}.x_1.x_2 + \ldots + b_{34}.x_3.x_4 + b_{11}.x_1^2 + \ldots b_{44}.x_4^2}$$

където: b0 - свободен член, b1,b2,b3,b4 - РК на математически модел пред СФ x1,x2,x3,x4; b12,b13,b14,b23,b24,b34 - РК, описващи взаимодействието на СФ; b11,b22,b33,b44; - РК пред квадратичните членове на математически модел (ММ).

За ИП при изследването е приета икономическата ефективност ηuk, определена като отношение на ползите от проекта, към общите разходи по време на експлоатационния период [10, 13]:

$$\mathbf{\eta_{uk}} = \frac{\text{ползи от проекта}}{\text{разходи за реализиране на проекта}} > \mathbf{1} \qquad \textbf{(4.21)}$$

Икономическата ефективност ηuk е по-голяма от 1, т.к. проекта реализира печалба, по-голяма от вложените средства. Ползите от реализацията на разглежданите проекти се определят с помощта на регламентирания от ЕС подход “полза - разходи”. За целта се използва метода за нетната настояща стойност (Net Present Value - NPV), като при всички от анализираните ФЕЦ, NPV>0, т.е. инвестициите повишават приходите от експлоатацията на проекта. Разходите от реализиране на проектите са оценени с помощта на приведените годишни разходи [10, 13].

В резултат на задълбочен анализ, в изследването са предложени следните СФ:

● *X1 - СФ от енергетичен характер, отчитащ характеристиките на генерираната ЕЕ, свързани с нейното качество, електромагнитна съвместимост и факторът на мощността;*

● *X2 - СФ от експлоатационен характер, свързан с експлоатационните характеристики на ФЕЦ;*

● *X3 - СФ от технически и технологичен характер, свързан с характеристиките на използваните PV модули, инверторите и системата за контрол, мониторинг и управление;*

● *X4 - СФ, оценяващ възвращаемостта на направената инвестиция, с помощта на срока на откупуване T на съоръжението.*

Всички съществени фактори са съвместими, т.е. могат да съществуват едновременно, независими и допускат количествена оценка. Представени са в относителни единици в табл.4.9., като стойностите им са получени въз основа на експертен анализ.

В табл.4.9. са представени нивата на СФ: долно (-1); основно (0) и горно ниво (+1).

Табл.4.9. Нива на изменение на СФ

СФ	Долно ниво (-1)	Основно ниво (0)	Горно ниво (+1)
X_1	0,15	0,19	0,23
X_2	0,25	0,31	0,37
X_3	0,32	0,42	0,62
X_4	0,14	0,18	0,2

След прилагана на пълен факторен експеримент с използване на план B_4 и извършване на статистическите проверки за значимост на РК и адекватност на ММ описани в т. се получава следната квадратична формула за ИП η_{UK}:

$$\eta_{uk} = 1,483 + 0,203.x_1 + 0,29.x_2 + 0,452.x_3.0,18.x_4 \quad (4.28)$$
$$+ 0,087.x_1.x_2 + 0,12.x_1.x_3 + 0,16.x_2.x_3$$
$$- 0,05.x_2.x_4 - 0,08.x_3.x_4 + 0,06.x_1^2 + 0,11.x_2^2$$
$$- 0,04.x_4^2$$

Анализът на получения математически модел показва следното:

● Стойностите на ИП за различните точки от плана на експеримента, се изменят в границите Y=(1,18÷1,64). Те са получени след анализ на информацията от счетоводните документи за изследваните ФЕЦ, направен от съответните икономисти и предоставена ни от финансово - икономическите отдели на бенефициентите. Проведени са също така анкети със специалисти и експерти по проектиране, изграждане, експлоатация и менажиране на обектите с цел затвърждаване на получената информация. Направеното анкетиране е в такъв обем, че осигурява необходимите за експеримента паралелни опити, които за всяка точка от плана B_4 са еднакъв брой (n=5). В този случай за оценка на дисперсията на грешката се прилага критерия на Кокрън (формули 1.27÷1.30).

● Влиянието на СФ X_1,X_2,X_3,X_4 върху ИП Y е отразено в линейната част на ММ и е разнородно и разнопосочно. Факторите X_1, X_2 и X_3 имат положителни РК и тяхното влияние върху ИП е положително, т.е. увеличаването им спомага за нарастване на стойността на η_{uk}. Четвъртият фактор X_4 има РК с отрицателна стойност (b_4 = - 0,18) и той има обратен ефект - намаляването му създава условия за увеличаване на ИП и обратно

● РК b_{12}; b_{13}; b_{14}; b_{23}; b_{24} и b_{34} отразяват ефектите на взаимодействие между СФ. Тук също се наблюдава разнородно и разнопосочно влияние на произведенията на съответните СФ, върху ИП. Коефициентите b_{12},b_{13} и b_{23} са положителни, b_{24} и b_{34} са отрицателни, а b_{14} не издържа теста за значимост и отпадна от модела. Произведенията от СФ с положителни РК предизвикват увеличение на η_{uk}, а взаимното действие на СФ с отрицателни РК способства за намаляване на η_{uk}.

● Квадратичните членове на ММ създават нелинейност на модела, формират дисперсионната му съставяща, т.е. определят разсейването около средната стойност на целевата функция η_{uk}. РК на квадратите на тези СФ имат положителни и отрицателни стойности, съответно b_{11} и b_{12} са положителни, а b_{44} е отрицателен. Ефекта на квадратичната стойност на фактора X_3 е незначим, т.к. този фактор има технически и технологичен характер (свързан е с характеристиките на PV модулите, инверторите и системите за мониторинг и управление). Неговото влияние върху ИП е твърдо, установено, непроменливо, с минимална дисперсионна съставяща, поради което РК b_{33} е статистически незначим.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

1. Въз основа на анализ на резултатите са формулирани и препоръки за рационализиране и оптимизиране на режимните параметри. За целта е синтезирана методика с използване на основните теоретични подходи на разработената от Ричард Дрехслер практично-приложна постановка за измерване и анализ на ПКЕЕ. Въз основа на дефиниране на допълнителни субстанции на мощността (пулсираща, скрита и деформационна мощности), се извършва по-пълно и адекватно формулиране на редица енергетични показатели и характеристики. Методът е предложен за апробиране при фотоволтаични системи, което по същество е иновативен подход в изследователския процес, провеждан относно подобни съоръжения.

2. Проведено е експлоатационно изследване в редица PV инсталации с различни мощности, натоварване и режими на работа. Информацията от различни мрежови анализатори с висок клас на измерване дава възможност да се извърши комплексен анализ с оценка на енергетични и експлоатационни показатели. Извършена е апробация на методиката, представена в т. 4. 2. и с нейна помощ са определени ПКЕЕ и различни субстанции на мощността (Q, N, S_0, D), респективно парциалните загуби на активна мощност ΔP_Q, ΔP_N, ΔP_{So}, ΔP_D. Приложен е нетрадиционен подход, съществено различен от класическия, при изследване на фактора на

мощността PF с отчитане на тези нехарактерни за практическо приложение, но прецизни постановки. Установени са редица неблагоприятни положения и влошени показатели в експлоатацията на ФВС, водещи до понижена генерация и добив на ЕЕ вследствие на работата на PV инсталациите с ефективност под проектно заложените номинални стойности.

3. В резултат от проведения изследователски процес е направен обобщен анализ и са предложени мерки за рационализиране и оптимизиране на режимите на работа на PV системите. Анализирани са технически дефекти и повреди, маркирани са експлоатационните фактори, предизвикващи аномалии и влошаване на PV съоръженията, а също така е определено влиянието на влошените електроенергийни показатели върху мощността и добива на ФЕЦ. Потвърдено е количествено, че при понижено натоварване (ниска генерация на ЕЕ), ФЕЦ работят с влошени характеристики - повишени стойности на показателите δ_U, ε_U, α_U, ε_I, α_I, THD_U, THD_I, ΔP_Q, ΔP_N, ΔP_{So}, ΔP_D. Това води до ниски стойности на фактора на мощността PF, който за настоящото изследване на представителна извадка от PV инсталации има средна стойност в границата PF = (0,87÷0,88). Констатирано е също така, че за голяма част от изследваните инсталации, реактивната съставяща на мощността има много чести капацитивен характер, което предизвиква регистриране на върната в системата капацитивна енергия, което се санкционира от доставчиците на ЕЕ. Посочените негативни предпоставки са щателно анализирани и са предложени мерки за тяхното отстраняване или минимизиране.

4. Апробирана е иновативна технология, във връзка с разработената постановка на база на ТПЕ, в т. 1. 6. от първа глава на дисертацията. В четири факторно пространство е съставена целева функция за ИП “икономическа ефективност” $\eta_{ик}$ на фотоволтаичните системи. Математическият модел дава възможност за определяне на оптимални нива на изменение на СФ и ИП. Доказано е, че този подход има универсално приложение, отличава се с висока достоверност, значимост и адекватност и чрез използването му може

да се получават високи нива на електроенергийната ефективност при експлоатацията на ФВС.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Анализирани са съвременните тенденции за проектиране и прилагане на иновативни технологии, оптимизиране на изграждането и експлоатацията на PV инсталации по критерий надеждност и сигурност с цел минимизиране на риска. Предложен е теоретичен подход, на база на ТПЕ за оптимизиране на СФ и ИП в многофакторно пространство, представляващ иновативна постановка, приложима при изграждане на съвременни ФВС.

1. Направен е задълбочен анализ на достиженията при проектиране, изграждане и експлоатация на ФВС, развитието и усъвършенстването на ново поколение PV модули, съоръжения и компоненти, иновативни технологии и продукти в светлината на постигането на висока технико-икономическа ефективност, експлоатационна стабилност и сигурност. Направен е анализ на архитектурните и структурните особености на системите за измерване, наблюдение, мониторинг и управление на ФВС от гледна точка на диагностичен контрол, като са подчертани възможностите за използване на прогресивните технологии на изкуствения интелект, невронните мрежи, размитата логика и др.

2. Симулирането и моделирането е мощен инструментариум за постигане на оптимални характеристики при ФВС. Синтезирани са математически модели на градивните елементи на ФВС, PV модула е моделиран при стандартни условия и при изменение на слънчевата радиация, температурата и засенчването, а мощностните V-A характеристики са адаптирани за изследване в среда MathCAD. Предоставено е моделиране и симулиране на напрежението и тока на заряд и разряд на оловно-киселинните батерии в среда Lab VIEW, като измервателния процес се извършва с помощта на DAQ

карта в екселска среда. Получените резултати от проведеното моделиране и симулиране потвърждават неговата ефикасност и целесъобразност при изследване на PV съоръжения.

3. За провеждане на реални изследвания на свързани към мрежата ФВС е приложена синтезираната в т. 4. 2. методика, с помощта на която се оценява качеството на ЕЕ, парциалните загуби на активна мощност ΔP_Q, ΔP_N, ΔP_{So}, ΔP_D определени чрез субстанциите на мощността Q, N, S_0, D. С отчитане на тези особености, фактора на мощността PF, е определен чрез прилагане на прецизен и точен иновативен подход, съществено различен от класическия. В резултат на направения пълен анализ се установени редица неблагоприятни положения при експлоатацията на ФВС, технически дефекти и повреди, аномалии и влошено енергийно състояние на PV съоръженията.

5. Потвърдено е, че при режим на ниска генерация, се влошават всички маркирани по горе показатели, респективни мощността и добива на ФЕЦ. В тази връзка, за минимизиране на тези негативни явления е приложен комплексен многофакторен подход, формулиран на базата на ТПЕ, който дава възможност да се оптимизират режимните параметри и подобри електро-енергийната и икономическа ефективност на експлоатираните PV системи. Полезността на проведения изследователски процес се потвърждава от формулираните ценни препоръки за рационализиране и оптимизиране на технико-икономическите характеристики на ФВС.

ПРИНОСИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

От дисертационният труд може да се формулират следните приноси, които са с научно-приложен и приложен характер:

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработена е математическа постановка във вероятностно-статистическа среда в многофакторно пространство. Математическият модел дава възможност за определяне на оптимални нива на изменение на съществените фактори и изходните параметри. Дефинирания метод има универсално приложение и се утвърждава като изследователска технология с висока степен на адекватност, достоверност, значимост и тъждественост, приложима за оптимизиране на процесите при PV инсталации.

2. Синтезирана е научно-обоснована методика въз основа на известни теоретични подходи, която дава възможност за дефиниране на допълнителни субстанции на мощността (пулсираща, скрита и деформационна). Резултатите от изследването утвърждават предложената постановка като иновативна, ефективна и прогресивна методология, успешно приложима за подобряване режимите на работа на различни PV системи

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. В процеса на проектиране, а също и при действащи ФВС е допустимо и целесъобразно съоръжения, параметрите и характеристиките им да се моделите и симулират с цел облекчаване или отказ от изследване в реални условия. В тази връзка е синтезирана нестандартна постановка за симулация работата на свързана към мрежата виртуална PV система в среда MatLab-Simulink. Резултатите от изследването потвърждават, че на база на създаденото моделиране, може да се разработи реална ФВС с добри показатели и характеристики.

2. С помощта на допълнително разработен софтуер се определят редица енергетични и ПКЕЕ при различни режими на работа на ФЕЦ. Установено е, че при ниско натоварване, т. е. при понижена генерация всички изследвани

показатели се влошават. Фактора на мощността, като глобален критерий за енергетичното състояние на PV системите, е прецизно определен с помощта на иновативна методика и има средна стойност за изследваната извадка от обекти в границите PF = 0, 87÷0, 88. Това е сравнително ниска стойност и показва незадоволително експлоатационно състояние и недостатъчно висока ефективност на PV съоръженията.

3. Направен е обобщен научно-обоснован анализ с практическа насоченост за експлоатационните характеристики на изследваните централи. Посочени са възможните дефекти и аварийни състояния на всички компоненти на ФВС.

4. Представеното систематично експертно разглеждане може да послужи като методическо ръководство на проектанти и експлоататори за цялостна диагностика на PV съоръжения и да се използва за анализ на риска, надеждността и сигурността при проектиране, изграждане и експлоатация на ФВС.

III. Публикации във връзка с дисертационната работа

[1]. Киров Р.М., Пройков М.А., Адамов А.Й., Разширен поглед върху комплексното понятие “Електромагнитна съвместимост” (EMC), Научно-техническа конференция “50 години специалност и катедра ЕСЕО”, ТУ-Варна, Електротехнически факултет, Варна 22.10.2023г., ISSN 2815-5238.

[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, ISSN 2367-6728.

[3]. Angelov M., Adamov A., Lukov M., Possibilities of Optimizing the Mode of Operation of Photovoltaic Plants, 2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), ISSN: 2831-5782

[4]. Adamov A., Angelov M., Panchev H., Iliev I., Technical Possibilities for Monitoring and Diagnostics of Photovoltaic Plants, 2023 15th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Electronic ISSN: 2831-5782.

[5]. Demirev R., Adamov A., Angelov M., Comparative analysis and options for construction lighting protection and grounding installations of photovoltaic systems, 2024 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA),ISBN:979-8-3503-8237-2

[6]. Angelov M., Adamov A., Lukov M., Creation of rational technical solutions the construction of photovoltaic systems, 2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF). ISSN: 2831-5774

[7]. Адамов А., Ангелов М., Луков М., Тенденции в развитието на слънчевата енергия в световен аспект, Енергиен форум 2024, Варна, юни 2024г., Сборник доклади, ISSN 2367-6728

[8]. Адамов А., Иновативни ефективни решения за PV клетки и PV модули, Енергиен форум 2024, Варна, юни 2024г., Сборник доклади, ISSN 2367-6728

[9]. Адамов А.И., Ангелов М., 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, 2024г., статия №2530, ISSN 1312-3823 (print); ISSN 2367-6620 (online).