

ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СЪВМЕСТИМОСТ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ

Силвия Лецковска, Камен Сейменлийски, Радослав Симионов
Бургаски свободен университет

Резюме: Настоящата статия представя резултатите от проведено обзорно литературно изследване, което има за цел да анализира проблемите на електромагнитната съвместимост на фотоволтаичните системи, които възникват с нарастване на техния брой и на инсталираната мощност. Това проучване представя обстоен преглед, фокусиран върху идентифицирането на основните източници на електромагнитни емисии във фотоволтаичните инсталации, механизмите, чрез които се генерират тези емисии, и регулаторната рамка, която регулира тяхното измерване и ограничаване. Особено внимание е обърнато на ролята на инверторите като доминиращ източник на нискочестотни електромагнитни полета.

Като цяло, констатациите потвърждават, че правилно проектираните и инсталираните на фотоволтаични системи отговарят на приложимите изисквания за EMC и не представляват риск за общественото здраве, като същевременно подчертава необходимостта от систематични оценки на EMC на различни системни конфигурации, тъй като прилагането на фотоволтаичните системи продължава да се разширява.

Ключови думи: електромагнитната съвместимост, фотоволтаичните системи.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Silviya Letskovska, Kamen Seymenliyski, Radoslav Simionov
Burgas Free University

Abstract: This article presents the results of a survey study conducted to analyze the electromagnetic compatibility problems of photovoltaic systems that arise with an increase in their number and installed power. This study presents a comprehensive review focused on identifying the main sources of electromagnetic emissions in photovoltaic installations, the mechanisms by which these emissions are generated, and the regulatory framework governing their measurement and limitation. Particular attention is paid to the role of inverters as a dominant source of low-frequency electromagnetic fields.

Overall, the findings confirm that properly designed and installed photovoltaic systems meet applicable EMC requirements and do not pose a risk to public health, while highlighting the need for systematic EMC assessments of different system configurations as the application of photovoltaic systems continues to expand.

Keywords: electromagnetic compatibility, photovoltaic systems.

Въведение

Електромагнитната съвместимост (ЕМС) се отнася до способността на електрическото и електронното оборудване да работи задоволително, без да смущава друго близко оборудване или система в реалната му електромагнитна среда. За да се гарантира, че електронните устройства, използвани в слънчевите енергийни системи, са безопасни и надеждни, е важно те да бъдат подложени на тестове за електромагнитна съвместимост (ЕМС). Тестването за ЕМС играе ключова роля в проверката дали устройствата отговарят на необходимите стандарти за ЕМС, за да работят безопасно и надеждно в разнообразна електромагнитна среда.

Електромагнитното излъчване от слънчевите панели е с ниска честота, което го отличава от излъчването, регистрирано от телевизори, компютри и други електронни устройства [1, 2, 3]. Честотата на излъчването на тези устройства е сравнително висока и може да има някои отрицателни ефекти върху човешкото тяло [4, 7, 8].

Тестването за електромагнитна съвместимост (ЕМС) се извършва за електронни устройства, като например инвертори, използвани в слънчеви енергийни системи, за да се гарантира, че устройството може да работи правилно, без да смущава други близки устройства в предназначенията му електромагнитна среда. Това тестване гарантира, че устройството е надеждно за употреба и отговаря на съответните стандарти за ЕМС [5].

Тестването за ЕМС обикновено включва два вида тестване: тестване за емисии и тестване за имунитет. Тези тестове обикновено се извършват в лабораторна среда (напр. без ехова камера) с необходимото оборудване, съгласно съответните изисквания на стандарта за ЕМС. Няколко различни вида тестове за ЕМС могат да бъдат извършени върху електронни устройства, използвани в слънчеви енергийни системи.

Тестването за емисии измерва нивата на електромагнитни смущения, излъчвани от устройството по време на работа. Целта на това тестване е да се гарантира, че тестваното устройство (DUT) не превишава ограниченията за емисии, посочени в стандартите за ЕМС, като по този начин се гарантира, че DUT не пречи на други близки устройства в същата среда. Тестването за емисии включва следните тестове [9, 10]:

- Тест за проводими емисии (CE). Този тест измерва нивата на проводими електромагнитни смущения, излъчвани от устройство по време на нормална работа, за да се гарантира, че тестваното устройство (DUT) не превишава ограниченията за проводими емисии, посочени в стандартите за ЕМС, като по този начин се гарантира, че DUT не пречи на други свързани устройства на същата линия по време на работа;

- Тест за излъчвани емисии (RE). Този тест измерва нивата на излъчвани електромагнитни смущения, излъчвани от устройство по време на нормална работа, за да се гарантира, че DUT не превишава ограниченията за излъчвани емисии, описани в стандартите за ЕМС, като по този начин се гарантира, че DUT не пречи на други близки устройства в същата среда;

- Тестване за хармоници и трептене. Този тест измерва хармонични токове и колебания на напрежението (т.е. трептене), причинени от DUT, и сравнява резултатите с ограниченията, посочени в съответните стандарти за ЕМС. Целта на този тест е да се гарантира, че DUT не превишава ограниченията за хармонични емисии и колебания на напрежението, определени от стандартите, като по този начин се гарантира качеството на захранването.

Тестването за имунитет се провежда, за да се оцени способността на устройството да издържа на външни електромагнитни смущения, като например кондуктив-

ни смущения, излъчени смущения, електростатичен разряд (ESD) и електрически бързи преходни процеси (EFT)/импулси, които могат да възникнат в реални среди. Целта на тестването за имунитет е да се гарантира, че устройството може да издържи на външни ЕМІ и да работи правилно в предвидената реална среда [11, 12, 13].

Тестването за EMC имунитет включва следните тестове:

- Тестване за кондуктивен имунитет. Оценява се способността на устройство-то да издържи на електрически шум, провеждан през електропроводи и кабели;
- Тестване за радиационен имунитет. Определя способността на устройството да издържи на излъчен ЕМ шум от външни източници;
- Тестване за електростатичен разряд (ESD). Оценява способността на устройството да издържи на електростатични разряди;
- Тестване за електрически бързи преходни процеси (EFT)/импулси. Оценява способността на устройството да издържи на EFT смущения;
- Тестване за спадове на напрежението - кратки прекъсвания - колебания на напрежението. Определя способността на устройството да издържи на спадове на напрежението, кратки прекъсвания и смущения, причинени от колебания на напрежението;
- Тестване за устойчивост на магнитно поле с мрежова честота. Оценява способността на устройството да издържи на магнитно поле с мрежова честота (50/60 Hz), което може да бъде причинено от близки проводници на електропроводи или друго оборудване в близост (напр. двигатели, трансформатори).

След завършване на тестването за електромагнитна съвместимост (EMC) резултатите се анализират, за да се определи дали устройството отговаря на изискванията и спецификациите на стандартите за EMC.

Ако продуктът не отговаря на изискванията на стандартите, производителят може да се наложи да направи промени или модификации, за да подобри неговите EMC характеристики. По този начин, тестването за EMC гарантира надеждността на електронните устройства и безопасната и надеждна работа на различните видове енергийни системи [14, 15, 16].

С навлизането на фотоволтаичните технологии, все по актуални стават и изследванията на електромагнитна съвместимост на слънчевите енергийни системи.

Първите фотоволтаични (PV) системи бяха изградени в началото на 2000-те години. Експлоатацията на тези системи доведе до появата на много неочаквани проблеми и повреди, причинени не само от лошото изпълнение, но и поради липсата на адекватна експертиза по отношение на характеристиките и начина на работа на фотоволтаичните централи. Възникнаха въпроси, свързани с електромагнитната съвместимост по отношение на кондуктивните смущения, както и въпроси, свързани с влиянието на нискочестотното излъчване от тези системи върху здравето на човека [17,18,19].

Едни от основните проблеми, свързани с работата на фотоволтаичните системи се оказаха радиационните ефекти. Чувствителни към електромагнитни смущения се оказаха военни съоръжения, летища или комуникационни съоръжения, построени в близост до фотоволтаични централи [20, 21, 22, 23].

CISPR 11 /EN 55011/ е международен стандарт, който определя изискванията за радиочестотни емисии (електромагнитни смущения) от индустриално, научно и медицинско оборудване (ISM). Той обхваща оборудване, работещо в честотния диапазон от 9 kHz до 400 GHz, като определя методите за измерване и допустимите нива на емисии. Стандартът разделя оборудването на две групи (Група 1 и Група 2) и два

класа (Клас А и Клас Б) според начина на употреба и допустимото разпространение [24, 25].

Слънчевите панели работят, като използват фотоволтаичния ефект на полупроводниковите материали, като преобразуват слънчевата енергия в електрическа.

Слънчевите панели генерират определено електромагнитно поле по време на работа. Интензитетът на това електромагнитно поле обаче е много нисък, далеч под международните стандарти за безопасност.

Например, въпреки че слънчевите инвертори използват силово електронно преобразуване, тяхната честота обикновено е 5-20 kHz и всички инвертори имат метално екраниране и отговарят на глобалния сертификат за електромагнитна съвместимост. Следователно, електромагнитното излъчване, генерирано от слънчевите панели и инверторите, е безопасно за човешка консумация.

Основните причини за електромагнитни смущения, генерирани от инвертора по време на работа, са честотата на превключване, бързото превключване на превключващите елементи, паразитната индуктивност и капацитета във веригата и други фактори. Високочестотните комутационни операции причиняват бързи промени в напрежението и тока, което от своя страна генерира електромагнитно излъчване и кондуктивни смущения [26, 27].

Нивата на шум на инвертора обикновено варират от <40 dB до 70 dB. Ако инверторът произвежда шум над 70 dB, това показва проблем.

Слънчевите панели генерират постоянен ток (DC) и произвеждат статично електрическо поле (0 Hz), което излъчва много малко електромагнитно поле (ЕМП). Това е нейонизиращо лъчение, което няма достатъчно енергия, за да увреди ДНК или да представлява риск за здравето, подобно на рентгеновите лъчи (йонизиращо лъчение) [28, 29, 30].

Многобройни проучвания са доказали, че нивата на електромагнитни полета от правилно инсталирани слънчеви системи са в рамките на международните насоки за безопасност, като например тези, определени от Международната комисия за защита от нейонизиращи лъчения (ICNIRP).

Получени са данни за сравнение на радиационното излъчване от типични домакински уреди [6]:

- При измерване стойностите на параметрите на магнитното поле, на разстояние от 0.3 до 1 метър от предната страна на инвертор, са получени стойности на радиационно излъчване, вариращо от 0.01 до 2.2 μT ;
- При измерване стойностите на параметрите на магнитното поле, в близост до повърхността на соларен панел, са получени стойности, вариращи от 0.037 до 0.19 μT ;
- При измерване стойностите на параметрите на магнитното поле на разстояние от 0.5 метра от типичен домакински уред, примерно хладилник, са получени стойности, вариращи от 0.05 до 0.5 μT , а на разстояние 0.3 метра от прахосмукачка – от 200 до 800 μT .

Основният източник на ЕМП в слънчевата система е инверторът, който преобразува постоянния ток от панелите в променлив ток (AC), използван в домовете. Този процес на преобразуване, заедно с променливотоковото окабеляване, създава нискочестотни ЕМП. Интелигентните измервателни уреди и оборудването за мониторинг, които използват радиочестотни (RF) сигнали, също допринасят за общото ЕМП в системата [31, 32, 33, 34].

За да се гарантира, че нивата на радиация на слънчевите инвертори отговарят на стандартите за безопасност, държавите и регионите са разработили серия от стандарти за изпитване и изисквания за сертифициране.

МЕЖДУНАРОДНИ СТАНДАРТИ

- IEC 62109 е стандарт за безопасност на слънчеви инвертори, разработен от Международната електротехническа комисия (IEC). Стандартът включва изисквания за електромагнитна съвместимост (EMC) на инверторите, за да се гарантира, че нивата им на радиация не причиняват неблагоприятни ефекти върху друго оборудване или човешкото тяло. Съгласно IEC 62109, слънчевите инвертори трябва да преминат серия от строги тестове, включително тестове за високо напрежение, тестове за изолационно съпротивление и диелектрична якост, тестове за заземяване, температурни тестове, тестове за влага и мухъл, тестове за издръжливост, тестове за радиация и смущения и др.;

- IEC 61000. Това е серия от стандарти за електромагнитна съвместимост (EMC), разработени от Международната електротехническа комисия (IEC). Сред тях IEC 61000-4-3 и IEC 61000-4-6 определят съответно изискванията за излъчването на радиочестотни електромагнитни полета от оборудването и имунитета на проводимите устройства. Слънчевите инвертори трябва да отговарят на тези стандарти, за да гарантират тяхната стабилност и безопасност в електромагнитна среда.

СТАНДАРТИ НА ЕС

- Слънчевите инвертори, продавани на пазара на ЕС, трябва да отговарят на изискванията за СЕ сертификация. СЕ сертификацията обхваща няколко аспекта на изискванията за безопасност и производителност, включително електромагнитна съвместимост (EMC). Нивата на радиация на СЕ-сертифицираните инвертори трябва да отговарят на Директивата за EMC (напр. 2014/30/ЕС), за да се гарантира, че те не причиняват неблагоприятни ефекти върху друго оборудване или човешкото тяло.

Кондуктивните смущения са електромагнитни смущения, предавани през проводници (проводници, кабели, шини) в електрическа верига. Те могат да бъдат:

- Нискочестотни (до 2 kHz) – причинени от токови импулси, превключване на товара и претоварвания;

- Високочестотни (от 2 kHz до 100 MHz и по-високи) – причинени от работата на импулсни устройства, преобразуватели, честотни регулатори, заваръчни машини и др.

Тези смущения се разпространяват през електропроводи, заземителни линии и космическо лъчение, засягайки околното оборудване.

СТАНДАРТИ ЗА ТЕСТВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ (EMC) ЗА СЛЪНЧЕВИ ЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ

Понастоящем няма специфични стандарти за EMC за слънчеви инвертори, тъй като в различни периоди слънчевите инвертори се считат както за домакински уреди, така и за ISM (промишлено, научно, медицинско) оборудване или като компоненти на информационните технологии.

Следователно, въз основа на използваната среда, стандартите за EMC, определени за жилищно, търговско, мултимедийно оборудване, промишлено, научно и медицинско оборудване, могат да се прилагат и за слънчеви инвертори [35, 36, 37, 38].

Някои от стандартите, свързани с тестването на ЕМС за електроника (напр. инвертори), използвана в слънчеви енергийни системи са следните:

- IEC 61000-6-1 – международен общ стандарт за ЕМС имунитет, който определя изискванията за имунитет за оборудване, използвано в жилищна, търговска и лекопромишлена среда;
- IEC 61000-6-2 – международен общ стандарт за ЕМС имунитет, който определя изискванията за имунитет за оборудване, проектирано за употреба в промишлена среда;
- IEC 61000-6-3 – международен общ стандарт за ЕМС емисии, който определя изискванията за емисии (проводими и излъчени) за оборудване, предназначено за употреба в жилищна среда (на закрито и на открито). Този стандарт се прилага и за оборудване, използвано в търговски и лекопромишлени среди;
- IEC 61000-6-4 – международен общ стандарт за електромагнитна съвместимост (ЕМС), който определя изискванията за емисии (проводими и излъчени) за оборудване, предназначено за употреба в промишлена среда (на закрито и открито);
- IEC 61000-3-2 – международен стандарт, който определя граници за хармонично излъчване на ток от електрическо оборудване, свързано към нисковолтовата електрозахранваща мрежа (входен ток на оборудването ≤ 16 А на фаза);
- IEC 61000-3-3 – международен стандарт, който определя граници за колебания на напрежението и трептене в нисковолтови електрозахранващи мрежи (за оборудване с номинален ток ≤ 16 А на фаза и неподлежащо на условно свързване);
- IEC 61727. Определя изискванията за свързване на фотоволтаични системи към разпределителната система на комуналните услуги, включително аспекти на електромагнитната съвместимост, за да се гарантира, че системите не влияят неблагоприятно върху стабилността на мрежата или друго свързано оборудване;
- CISPR 11. Това е международен стандарт, който определя границите на емисиите и методите за измерване на проводими и излъчени емисии от промишлено, научно и медицинско (ISM) оборудване;
- CISPR 14-1 – международен стандарт, който определя границите на емисиите и методите за измерване на проводими и излъчени емисии от домакински уреди, електрически инструменти и подобни апарати.
- CISPR 32: международен стандарт, който определя границите на емисиите и методите за измерване на проводими и излъчени емисии от мултимедийно оборудване;
- EN 61000-6-3 – европейски стандарт, еквивалентен на IEC 61000-6-3;
- EN 61000-6-4 – европейски стандарт, еквивалентен на IEC 61000-6-4;
- EN 61000-3-2 – европейски стандарт, еквивалентен на IEC 61000-3-2;
- EN 61000-3-3 – европейски стандарт, еквивалентен на IEC 61000-3-3;
- IEEE 1547 – стандарт на IEEE, подготвен за свързване на разпределени ресурси с електроенергийни системи;
- UL 1741. Прилага се в САЩ за инвертори, конвертори, контролери и оборудване за взаимосвързване, предназначено за използване с разпределени енергийни ресурси.

Тези стандарти гарантират, че електрониката в слънчевата енергийна система е достатъчно надеждна, за да работи в предвидените реални условия. Обикновено слънчевите инвертори са проектирани с ЕМІ филтри на своите входове, изходи и всички сигнални/контролни връзки. Те също така са добре екранирани и използват други добри ЕМС дизайнерски практики (напр. използване на екранирани кабели), за да отговорят на изискванията на ЕМС стандартите [39, 40, 41, 42, 43].

Европейският съюз гарантира надзор на изискванията за електромагнитна съвместимост (ЕМС) чрез националните органи за надзор на всяка държава членка [1, 44, 45, 46]. Тези органи могат да налагат забрани за продажба на продукти или да спират работата на инсталациите, докато високите нива на електромагнитно излъчване не бъдат ликвидирани. Много често радиолюбителите се оплакват, че PV – системите влияят на пречат на техните комуникационни честоти [2, 47, 48, 49].

За да се установи нивото на електромагнитното излъчване от фотоволтаичните системи би трябвало да бъдат изследвани всички съществуващи системи. Това би бил един труден процес, т.к. че процесът на изследване изисква много време и инвестиции, а също и поради факта, че отделните системи са различни по отношение на използваните компоненти, начина на монтаж и други технологични параметри.

Има данни [3, 50, 51] от проведени систематични измервания на ЕМИ /електромагнитни излъчвания/ върху 34 фотоволтаични системи с пикова мощност до 5 kW в честотния диапазон от 150 kHz до 30 MHz.

Причината за избор на този честотен диапазон е факта, че повечето доклади за смущения се отнасят до този честотен диапазон. Резултатите от проведеното изследване са показали, че е малко вероятно стринг инверторите да смущават радиокомуникацията, ако фотоволтаичната система е инсталирана съгласно нормативните документи.

Данните показват също, че е по-вероятно инверторите с оптимизатори на модули да смущават радиокомуникацията, а също, че промяната към двустранни модули стъкло-стъкло без алуминиева рамка значително увеличава излъчените електромагнитни емисии.

Двустранните стъклени модули в комбинация с оптимизатори на модули показват по-изразена 200 kHz сигнатура и излъчват в по-широк честотен диапазон от системите с едностранни модули с алуминиева рамка.

Проведено изследване [4, 52, 53] показва, че фотоволтаичните системи са отбелязали увеличение на броя и разнообразието на захранващите компоненти, разположени на място, в броя на електроразпределителните системи и нивата на напрежение, които те изискват, както и увеличение на сложността на окабеляването, заземяването и свързването. Нещо повече, налице са някои особености на тези системи:

- Съвместно разпаоложение на дълги DC и AC кабели за захранване и сигнални кабели;
- Разположени в близост кабели, работещи на много различни нива на напрежение;
- Сложна система за заземяване и свързване, поради наличието на много метални конструкции;
- Разположени наблизо устройства с висока плътност на мощността за преобразуване на енергия и чувствителни електронни системи за мониторинг и управление; разположение на електрическата система предимно на открит участък.

Фотоволтаичните системи са източник на електромагнитно излъчване. Основните източници на електромагнитното излъчване в слънчева енергийна система са инверторът и окабеляването за променлив ток, а не самите слънчеви панели.

Слънчевите панели не произвеждат йонизиращо лъчение. Йонизиращото лъчение е форма на лъчение, способна да увреди клетъчната ДНК и се излъчва от определени специфични вещества, като ядрени реактори и радиоактивни елементи. От друга страна, излъчването от слънчевите панели е електромагнитно, което е различно от йонизиращото лъчение [54, 55, 56, 57].

Радиацията, която излъчват панелите е електромагнитна и произхожда предимно от полупроводниковите материали на панелите. Интензитетът на излъчването от панелите е много нисък, тъй като се генерира на повърхността на панела и бързо се освобождава в атмосферата. Освен това, слънчевите панели обикновено се инсталират на известно разстояние от човешкото тяло, което също намалява риска от излагане на човека на това лъчение [58, 59].

Федералната комисия по комуникациите (FCC), институция, специфична за Съединените щати и Американската агенция за опазване на околната среда (EPA) са установили насоки за безопасност за излагане на електромагнитни полета. Слънчевите инсталации постоянно се проверяват и установеното излъчване е доста под допустимите стойности – често с коефициенти от 100 или повече [60, 61].

Правилно инсталираната фотоволтаична система обикновено произвежда нива на електромагнитни полета между 0,5-2 милигауса на нормални разстояния.

Слънчевите панели, от друга страна, излъчват нискочестотно електромагнитно лъчение и не са вредни за човешкото тяло.

Има данни от 2019 г. за регистриране смущения от слънчеви фотоволтаични конвертори, основно за Европа и САЩ.

Електромагнитните смущения (EMI) от соларни системи могат да намалят производителността на системата и да компрометират надеждността. Тези смущения могат да повлияят неблагоприятно и на околното електронно оборудване.

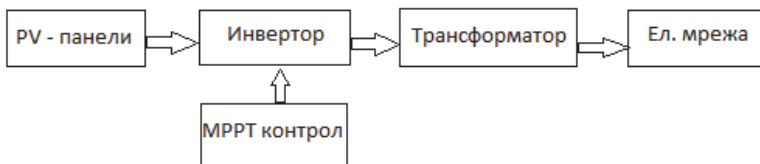
През 2020 г. беше съобщено, че шведското Министерство на отбраната е провело проучване на въздействието на електромагнитното излъчване от слънчеви електроцентрали върху радиокомуникационните системи и е заключило, че такива системи могат да пречат на военните и гражданските радиокомуникации.

Силовият конвертор е основният източник на високочестотни сигнали, които могат да се разпространяват както към постоянна, така и към променливотокова страна като синфазни (CM) и диференциални (DM) сигнали. За системите, външни за PVI, панелите и DC кабелите могат да действат като антени и следователно могат да се третираат като източници на лъчение.

За съвременните големи фотоволтаични централи, DC кабелите и AC линиите могат да се простират на няколкостотин метра и следователно могат да действат като преносни линии.

Трансформаторът е важен при анализа на големите фотоволтаични централи, но обикновено липсва за фотоволтаични инсталации с мощност под 10 kW, които се използват главно за битови приложения.

Основните блокове, предмет на изследване на електромагнитна съвместимост са представени на **Грешка! Източникът на препратката не е намерен.**



Фигура 1. Диаграма на фотоволтаична система изобразяваща взаимодействието при EMC

Електромагнитното излъчване е най-високо в близост до инверторите, но намалява значително с увеличаването на разстоянието.

Фотоволтаичните централи генерират изключително нискофреkwотни електромагнитни излъчвания, подобни на тези от домакинските уреди.

Фотоволтаичните панели съдържат полупроводникови клетки и метални шини за пренасяне на генерирания ток. Тази активна част е разположена между задния панел и стъкленика капак и е обградена от алуминиева рамка [62, 63].

От гледна точка на електрическите вериги, тази структура може да се моделира като паразитен капацитет или комбинация от индуктор и кондензатор спрямо земята. За изучаване на излъчените смущения структурата може да се моделира като антена. Електромагнитната съвместимост (ЕМС) от фотоволтаични панели може да бъде разглеждана в следните две направления:

- Модели на паразитен импеданс (ZPV) на фотоволтаични панели. Това е важно за анализа на кондуктивните емисии или синфазните (СМ) вериги;
- Модели на панелите като антена. Това е важно за анализа на излъчените емисии.

Някои причини за ЕМІ в соларните инвертори включват:

- Твърдо превключване и високочестотен шум. Соларните инвертори използват специални превключватели за преобразуване на постоянен ток в променлив ток. Бързото превключване може да причини внезапни колебания на напрежението;
- Неправилни практики за заземяване. Лошото заземяване може да създаде контури, които действат като антени за ЕМІ;
- Недостатъчна защита на компонентите. Екранирането предпазва чувствителните компоненти от външни смущения. Без подходящо екраниране, електромагнитните вълни могат да проникнат и да причинят проблеми;
- Проблеми с монтажа на кабелите. Кабелите, поставени близо един до друг, могат да действат като антени.

Съществуват няколко метода за елиминиране на електромагнитните смущения от слънчеви инвертори:

- *Заземяване.* Металният корпус на инвертора трябва да бъде правилно заземен, за да се осигури безопасно протичане на ток в случай на изтичане на ток, да се намали рискът от токов удар и ефективно да се намалят електромагнитните смущения между оборудването.
- *Филтриране.* Входните и изходните портове на инвертора трябва да бъдат проектирани с ЕМІ филтри, които филтрират високочестотни смущаващи сигнали и предотвратяват излъчването на шум от инвертора към външния свят.
- *Екраниране.* Инверторът може да бъде обвит в метален корпус, като алуминий или желязо, за да се блокира пътя на разпространение на електромагнитни смущения.
- *Технология за меко превключване.* Технологията за меко превключване може ефективно да намали скоростта на промяна на напрежението и тока и да намали електромагнитните смущения.

Заклучение:

От проведеното обзорно литературно изследване могат да бъдат формулирани следните изводи:

- Слънчевите панели и инверторите генерират нейонизиращо електромагнитно излъчване. За разлика от йонизиращото лъчение (като рентгенови лъчи или гама лъ-

чи), което може да увреди ДНК и клетките, не-йонизиращото лъчение няма достатъчно енергия за това;

- Слънчевите панели генерират постоянен ток (DC) и излъчват минимални статични електрически полета. Основният източник на нискочестотни ЕМП е инверторът (който преобразува DC в променлив ток/AC) и свързаното с него AC окабеляване;

- При соларните панели измерените стойности за електрическото поле варират между 0.07 и 1.33 V/m;

- Измерените стойности за магнитното поле варират между 0.037 и 0.19 μT (микро тесла);

- Пред инвертора измерената стойност на електрическото поле достига 0.7 V/m, а измерената стойност на магнитното поле – 2.2 μT [6, 64, 65].

Всички измерени стойности на електрическото и магнитното поле са значително под международните граници за безопасност, определени от организации като ICNIRP (Международната комисия за защита от нейонизиращи лъчения). По-конкретно, стойността от 2.2 μT пред инвертора е много ниска в сравнение с границата на ICNIRP, която е в размер на 100 μT за широката общественост.

Литература:

- [1]. Regulation (EU) 2019/1020 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on Market Surveillance and Compliance of Products and Amending Directive 2004/42/EC and Regulations (EC) No 765/2008 and (EU) No 305/2011, OJ L 169/1. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELLAR:903d90ee-9712-11e9-9369-01aa75ed71a1> (accessed on 9 August 2023). <http://www.gizmag.com>
- [2]. Schwarzburger, H. Optimizers Can Interfere. Photovoltaic. 2020; pp. 16–17. Available online: https://www.uska.ch/wp-content/uploads/2020/04/PV2-2020_DC-Optimierer.pdf (accessed on 22 November 2022). In German
- [3]. Désirée Kroner, Urban Lundgren, André Augusto and Math Bollen, Radiated Electromagnetic Emission from Photovoltaic Systems - Measurement Results: Inverters and Modules, Energies 2024, 17, 1893. <https://doi.org/10.3390/en17081893> <https://www.mdpi.com/journal/energies>
- [4]. Erika Stracqualursi, Member, IEEE, Gianfranco Di Lorenzo, Member, IEEE, Luigi Calcara, Member, IEEE, EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants: An Update After 15 Years, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 66, NO. 5, OCTOBER 2024
- [5]. <https://www.emc-directory.com/community/what-is-a-solar-power-system-emc-testing-in-solar-power-systems-how-is-emc-testing-performed-for-solar-power-systems-related-emc-testing-standards>
- [6]. Merve Bedeloglu, Niyazi, Il, Kayhan Ates and Sükrü Özen, MEASUREMENT AND ANALYSIS OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD STRENGTH IN GRID-TIED PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM COMPONENTS, Radiation Protection Dosimetry (2021), pp. 1–8, doi:10.1093/rpd/ncab070
- [7]. Juswardy, B. et al. Radiated EMI emission study on photovoltaic module for radio astronomy receiver front-end. In: Electromagnetic Compatibility Symposium-Perth (Piscataway, NJ: IEEE) pp. 1–4 (2011).

- [8]. Wu, I., Shinozuka, T., Ishigami, S. and Matsumoto, Y. Evaluation of electromagnetic radiation from the DC side of a photovoltaic power generation system. *IEEE Electromagn. Compat. Mag.* 4(2), 73–81 (2015).
- [9]. Ozen, S. Evaluation and measurement of magnetic field exposure at a typical high voltage substation and its power lines. *Radiat. Prot. Dosimetry* 128(2), 198–205 (2008).
- [10]. Helhel, S. and Ozen, S. Assessment of occupational exposure to magnetic fields in the high voltage substations (154/34.5kV). *Radiat. Prot. Dosimetry* 128(4), 464–470 (2008).
- [11]. Loschi, H. J., Ferreira, L.A. S., Nascimento, D.A., Cardoso, P. E. R., Carvalho, S. R. M. and Conte, F. EMC evaluation of off-grid and grid-tied photovoltaic systems for the Brazilian scenario. *J. Clean Energy Technol.* 6(2), 125–133 (2018).
- [12]. Safigianni, A. S., Spyridopoulos, A. I. and Kanas, V. L. Electric and magnetic field measurements in a high voltage center. *Ann. Occup. Hyg.* 56(1), 18–24 (2012).
- [13]. İl, N., Özen, S., Carlak, H. F. and Çakır, M. Yeraltı Enerji Kablolari Çevresinde Oluşan Manyetik Alanların Analizi ve Kontrolü. In: IV. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, İzmir, October 2015. (Ankara Turkey: Chamber of Electrical Engineers) pp. 67–72 (2015).
- [14]. Safigianni, A. S. and Tsimtsios, A. M. Electric and magnetic fields due to the operation of roof mounted photovoltaic systems. In: *Progress In Electromagnetic Research Symposium Proceedings*, Stockholm, August 2013. (Cambridge, MA: The Electromagnetics Academy) pp. 1908–1911 (2013).
- [15]. Karawia H., Ali M. ELF electric and magnetic fields emission due to rooftop photovoltaic system. In: *23rd International Conference on Electricity Distribution*, Lyon, June 2015. (Liège, Belgium: CIRED) pp. 1–4 (2015).
- [16]. McCallum, L. C., Aslund, M. L. W., Knopper, L. D. et al. Measuring electromagnetic fields (EMF) around wind turbines in Canada: is there a human health concern *Environ. Health* 13(9), 1–8 (2014).
- [17]. Fard, M. S., Nasiri, P. and Monazzam, M. R. Measurement of the magnetic fields of high-voltage substations (230 kV) in Tehran (Iran) and comparison with the ACGIH threshold limit values. *Radiat. Prot. Dosimetry* 145, 421–425 (2011).
- [18]. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys.* 99(6), 818–836 (2010).
- [19]. Gubernskiy Yu.D., Goshin M.E., Kalinina N.V., Banin I.M., „Hygienic aspects of electromagnetic pollution of indoor environment,“ *Hygiene and Sanitation*, Russian journal, том 95(4), pp. 329-335, 2016
- [20]. IARC Monogr. „IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields,“ pp. 1-460, 2013.
- [21]. Li, H., Liu, Z., Liu, R. et al, „The relationship between work stress and work ability among power supply workers in Guangdong,“ *BMC Public Health* 16, 2015
- [22]. Okoliski, Dr. St., „The influence of electromagnetic fields and radiofrequency radiation on human and animal reproduction,“ *IBIR-BAN*, 2017.
- [23]. Fil E.S., Ignatiev I, „Study of low-frequency magnetic fields and their impact on human,“ *Young scientist*, pp. 31-32, 2016.
- [24]. Karki, Pujan, „Human Exposure to Electromagnetic Field and Electromagnetic Compatibility,“ *Helsinki Metropolia University of Applied Sciences*, 2017

- [25]. Wang, Z., Wang, L., Zheng, S. et al., „Effects of electromagnetic fields on serum lipids in workers of a power plant,“ *Environ Sci Pollut Res* 23, № doi: 10.1007/s11356-015-5500-9
- [26]. Di Nallo, A.M., Strigari, L., Giliberti, C. et al., „Monitoring of people and workers exposure to the electric, magnetic and electromagnetic fields in an Italian national cancer Institute,“ *Exp Clin Cancer Res*, том 16, № <https://doi.org/10.1186/1756-9966-27-16>, 2008
- [27]. Frantsiyants E.M., Sheiko E.A., „ANTITUMOR EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELDS AND THEIR EFFECT ON PAIN IN EXPERIMENTAL AND CLINICAL ONCOLOGY,“ *Research and Practical Medicine Journal.*, том 2, pp. 86-99, 2019
- [28]. Kheifets L, Ahlbom A, Crespi CM, Draper G, Hagihara J, Lowenthal RM, Mezei G, Oksuzyan S, Schüz J, Swanson J, Tittarelli A, Vinceti M, Wunsch Filho V., „Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia,“ *Br J Cancer*. Erratum in: *Br J Cancer*. 2011 Jan 4;104(1):228. PMID: 20877339; PMCID: PMC2965855., том 7, № 107, 2011.
- [29]. Barsam, T., Monazzam, M.R., Haghdoost, A.A. et al., „Effect of extremely low frequency electromagnetic field exposure on sleep quality in high voltage substations,“ *J Environ Health Sci Engineer*, том 9, № 15, 2012.
- [30]. Lewczuk, B., Redlarski, G., Żak, A., Ziółkowska, N., Przybylska-Gornowicz, B., & Krawczuk, M., „Influence of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields on the Circadian System: Current Stage of Knowledge,“ *BioMed Research International*, 2014.
- [31]. Li G, Li B, Yang SF, Pang XF, „The influences of static magnetic field on the electric features of testicular tissue of rats,“ *Aerospace Medicine and Medical Engineering*, pp. 172-175, 2012.
- [32]. Li G, Yan YJ, Huan Y, Zhou Y, Pang, „The influences of electromagnetic field with extremely low frequency on the characteristics of infrared spectrum of the sensitive tissue in rat,“ *Spectroscopy and Spectral Analysis*, том 32, 2012
- [33]. Kamen Seymenliyski, Silviya Letskovska, Radoslav Simionov, Eldar Zaerov, „Electrical equipment impact on the environment and quantity factor measurement,“ *Proceedings of the Seventh International Conference on Telecommunications and Remote Sensing*, p. 41–44, 2018.
- [34]. Feng, Pang & Gun, Li., „The Influences of Electromagnetic Field Irradiated by High Voltage Transmission Lines with 50 Hz on the Features of Blood in Animals,“ *Journal of Tissue Science & Engineering*, 2017.
- [35]. Heredia-Rojas, Jose & Rodriguez de la Fuente, Abraham & Gomez-Flores, Ricardo & Heredia-Rodríguez, Omar & Rodríguez-Flores, Laura & Castañeda-Garza, Esperanza., „In Vivo Cytotoxicity Induced by 60 Hz Electromagnetic Fields under a High-Voltage Substation Environment,“ *Sustainability*, том 10, 2018.
- [36]. Zhang, X.; Ni, X.; Wei, B.; Wang, S.; Yang, Q., „Characteristic Analysis of Electromagnetic Force in a High-Power Wireless Power Transfer System,“ *Energies*, том 11, 2018.
- [37]. K. F. Warnick, „Teaching electromagnetic field theory using differential forms,“ *Teaching Electromagnetics*, 2021.
- [38]. Hasan, G. T., Mutlaq, A. H., & Ali, K. J., „The Influence of the Mixed Electric Line Poles on the Distribution of Magnetic Field,“ *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, pp. 292-301, 2022.

- [39]. Chawda, G. S., Su, W., & Wang, M., „A comprehensive review of high-frequency AC microgrids for distribution systems,“ *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024.
- [40]. Natalya, B., Vasily, Z., Andrey, K., & Dmitriy, S., „Simulation of electromagnetic fields generated by overhead power lines and railroad traction networks,“ *nergy Systems Research*, pp. 70-88, 2021.
- [41]. Adekunle, A., Ugonna, M. C., Olaifa, O. A., & Olumide, O. O., „Estimation of EMF Parameters From Distrbution Transformers and Their Impacts on Selected Health Indicators of Building Residents: Case Study of Ejigbo Environs, Isolo, Lagos State, Nigeria,“ *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021
- [42]. Koziorowska, A., Adydan-Kidacka, D., Kopacz, P., & Krasowski, R., „The propagation of the electromagnetic field emitted by medical equipment,“ *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 206-209, 2020.
- [43]. Hakim, Muhammad & Prasojo, Rahman & Duanaputri, Rohmanita & Wijaya, Bustani & Amaral, Hanifiyah, „Transformer oil degradation detection system based on color scale analysis.,“ *Indonesian Journal of E E and Computer Science*, pp. 15-25, 2025
- [44]. Gang, L., Cong, L., Xiaofu, X., Jian, H., Kun, L., Runhao, Z., & Ruijin, L., „Simulation of the magnetic field distribution and voltage error characteristics of the three-phase three-component combined transformer with new three-cylinder core structure.,“ *IEEE transactions on Magnetics*, 2020
- [45]. Mahin, A. U., Islam, S. N., Ahmed, F., & Hossain, M. F., „Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid,“ *IET generation, T & distribution*, 2022
- [46]. Камен Сейменлийски, Силвия Лецковска, Радослав Симионов, „ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ НА ТРАНСФОРМАТОР СРЕДНО/НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ,“ *INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE „Multidisciplinary Innovations for Social Change: Educational Transformations and Entrepreneurship*, pp. 630-635, 2024.
- [47]. Lu Shen, Zhenpeng Li, Tao Ma, „Analysis of the power loss and quantification of the energy distribution in PV module,“ *Applied Energy*, 2020
- [48]. Незадължително ръководство за добри практики при прилагане на Директива 2013/35/ЕС за електромагнитните полет, Том 1: Практическо ръководство, 2015.
- [49]. Европейски съюз, Практическо ръководство за добри практики при прилагане на Директива 2013/35/ЕС за електромагнитните полета Том 2: Проучвания на конкретни случаи, 2015.
- [50]. Европейски съюз, Незадължително ръководство за добри практики при прилагане на Директива 2013/35/ЕС за електромагнитните полета РЪКОВОД-СТВО за малки и средни предприятия (МСП), 2015.
- [51]. Behzad Hashemi, Shamsodin Taheri, Ana-Maria Cretu, Edris Pouresmaeil, „Systematic photovoltaic system power losses calculation and modeling using computational intelligence techniques,“ *Applied Energy*, 2021
- [52]. Hashemi, Behzad, „Computational intelligence-based photovoltaic system performance modeling in snow conditions,“ *hehis Presented to Département d’informatique et d’ingénierie Université du Québec en Outaouais (UQO) In partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Ph.D*, 2023.
- [53]. Israel, Michel, Ivanova, Michaela, Shalamanova, Tsvetelina and Zaryabova, Victoria, *A Guide of Non-Ionizing Radiation Protection*, 2021: NCPHA.

- [54]. Мишел Израел, проф. дм, Михаела Иванова, доц. дм, Цветелина Шаламанова, дм, Виктория Зарябова, Ръководство по защита от нейонизиращите лъчения, НЦ по ОЗА.
- [55]. Радостин Долчинков, Христо Михайлов, „ИНЖЕНЕРИНГОВА БЕЗОПАСНОСТ ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ,“ БСУ - ГОДИШНИК, том XLVIII, pp. 330-345, 2023.
- [56]. Пламен А. Ангелов, Димитър Юдов, Ангел Тошков, „Оценка на влиянието на електромагнитното поле върху човека. Сравнение между препоръчителни и измерени стойност,“ Телеком, pp. 191-197, 2009.
- [57]. Пламен А. Ангелов, Димитър Юдов, Ангел Тошков, „Изследване плътността на електромагнитни излъчвания в гр. Бургас“, Телеком, pp. 206-213, 2009.
- [58]. Matsankov M., S. Petrov, „Induced Voltage Modeling for a Disconnected Ungrounded Conductor of a Three-Phase Power Line,“ 4th International Conference on Power and Energy Technology, 2022
- [59]. Радостин Долчинков, Радослав Симионов, Камен Сейменлийски, „АЛГОРИТЪМ ЗА ОЦЕНКА НА РИСКА ПРИ ЕКСПОЗИЦИЯ ОТ НИСКОЧЕСТОТНИ МАГНИТНИ ПОЛЕТА,“ Годишник БСУ, pp. 179-199, 2024.
- [60]. Радослав Симионов, Камен Сейменлийски, Асен Кирилов, „КОНТРОЛЕР ЗА НАБЛЮДЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ ПОЛЕТА,“ INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE „Multidisciplinary Innovations for Social Change: Educational Transformations and Entrepreneurship“, pp. 675- 679, 2024
- [61]. Angelov P.A., Small Solar System Design, Polynomial Transfer Function Derivation - Part 2, (2024) 15th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2024 - Proceedings, DOI: 10.1109/ELECTRONICA63645.2024.11146240
- [62]. Angelov P.A., Small Solar System Design, Polynomial Transfer Function Derivation - Part 2, 2024 15th National Conference with International Participation (ELECTRONICA)
- [63]. Angelov P.A., Simulation of a Small PV System Installed in an Urban Area 2024 15th National Conference with International Participation (ELECTRONICA)
- [64]. Petrenyov, Daniil., „Реакции перитонеальных макрофагов крыс на продолжительное воздействие переменного магнитного поля низкой частоты 50 Гц,“ Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, pp. 147-149, 2015.
- [65]. Семенов, А.В., „Обоснование предельно допустимых норм на индукцию магнитных полей промышленной частоты для человека,“ Известия Томского политехнического университета, № 321, pp. 197-200, 2012.