
RECENT CHALLENGES IN RENEWABLE-BASED ENERGY SYSTEMS²

Assoc. Prof. Konstantin Koev, PhDDepartment of Electric Power Supply and Electrical Equipment,
Department of Philological and Natural Sciences, Silistra Branch,

University of Ruse “Angel Kanchev”

Phone: +359 82 888/ 201, 661

E-mail: kkoev@uni-ruse.bg

Abstract: *The paper presents and analyzes current data on the use of renewable energy sources for electricity production in the world and Europe and Bulgaria. The advantages and challenges of some of the most widely used modern converters – photovoltaic systems and wind generators, are examined. A current example of the joint operation of modern power systems and technical facilities for generating electricity from renewable sources in Spain and Portugal is presented. The significant events and their sequence that caused the black out of the power systems of the two countries on April 28, 2025 have been analyzed. Current solutions for increasing the resilience of systems, their advantages and challenges are presented. Examples of current solutions in Bulgaria are examined.*

Keywords: *Renewable energy sources, Electric power systems, Black out, Resilience of power systems*

ВЪВЕДЕНИЕ

Възобновяемите енергийни източници се използват все по-широко в националните енергийни системи. Причините са приетите глобални и национални цели за ограничаване замърсяването на околната среда, поради използването на конвенционалните енергийни ресурси и др. (UNFCCC, Climate Change Laws of the World, European Commission Europe Climate Law).

Възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) се използват от векове, като енергията на някои от тях се е преобразувала основно в механична или топлинна (Lefort, J. S. & N. Simic, 2024). Втората индустриална революция (края на XIX в. – началото на XX в.) определя широкото приложение на електрическата енергия, което непрекъснато нараства (Richmond Vale Academy, 2022). Възобновяемите източници са безплатни, екологично безопасни и са достъпни в големи количества, практически те са неограничени. Тези ресурси могат да осигурят необходимите количества енергия, при прилагане на подходящи технологии.

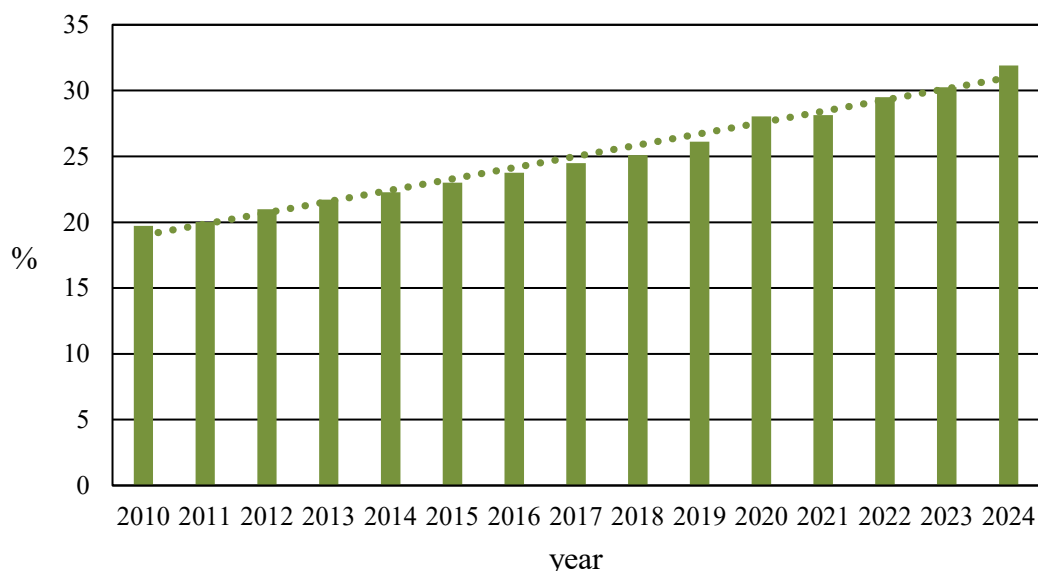
Възобновяеми източници с много голямо значение и приложение в съвременните условия са водните ресурси, като към момента с най-голямо значение са съоръженията (язовири), които преобразуват гравитационната потенциална енергия на водата в кинетична за задвижване на турбини. Следващите по значение източници са слънчевата радиация и естественото движение на въздушни маси (ветрове). Други водни ресурси, но с по-малко значение, са морски и океански вълни, приливи/отливи и течения; речни течения. По-ограничено, все още, е приложението на биомаса и геотермални източници (вода, земна маса). Съвременните технологии за усвояване на енергия от възобновяеми източници са насочени основно за получаване на електрическа и топлинна енергия (IRENA, 2025, Ember, 2025). Разработени са и други системи, които преобразуват енергията на възобновяемите източници в друг вид, подходящ за определени цели. Например, произведената електрическа енергия от ВЕИ се използва за получаване на водород H₂ (необходим за горивни клетки), компресиране на въздух и др. Водородът и въздухът могат да се съхраняват продължително и в даден момент да се използват. По тази причина подобни системи намират приложение за съхраняване на енергия (Sahoo, U., 2021).

² Докладът е представен на пленарната сесия на 17 октомври 2025 г. с оригинално заглавие на български език: СЪВРЕМЕННИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ СИСТЕМИ С ВЪЗООБНОВЯЕМИ ИЗТОЧНИЦИ НА ЕНЕРГИЯ

ИЗЛОЖЕНИЕ

Електрическа енергия от възобновяеми енергийни източници

Произведената електрическа енергия от възобновяеми източници в света непрекъснато се увеличава през последните 15 г. - (2010...2024) г. (Фиг. 1), като започва от 19,72% през 2010 г. и достига 31,92% през 2024 г. (Our World in Data 2, 2025). С най-голям дял в производството за 2024 г. са водните източници (14,32%), вятъра (8,09%) и слънчевата радиация (6,91%). Делът на последните два източника непрекъснато расте за периода (2010...2024) г. Водните източници участват с почти постоянен дял (около 16,3%) в периода (2010...2016) г., а през следващите години е регистриран непрекъснат спад (общо



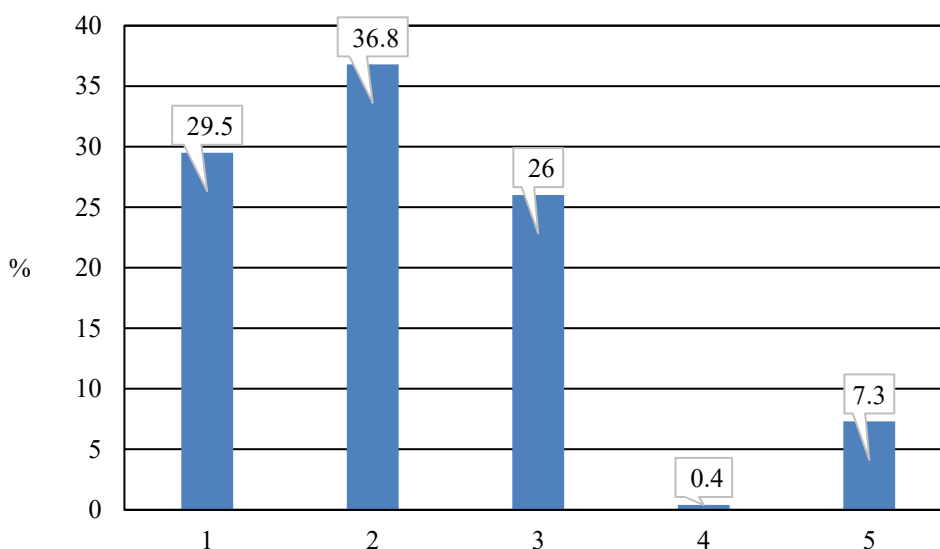
Фиг. 1. Дял на възобновяемите източници (%) в общото производство на електрическа енергия в света

с 0,5%). Изключение е 2020 г., когато стойността нараства със скок до 16,26%. През следващите години до 2023 г. отново се наблюдава спад с 2%, като стойността достига до 14,26%, а през 2024 г. делът на водните източници малко се увеличава до 14,32%. Вероятни причини за промените в дела на водните ресурси са климатични фактори (по-високи температури, по-малко валежи) и технически причини (аварии, реконструкции и др.) (Our World in Data 1, 2025).

Електрическата енергия, произведена от възобновяеми източници в Европа, през второто тримесечие на 2025 г., е 54%. Това е с 1,3% повече от количеството за същия период на 2024 г. (Eurostat, 2025). С най-голям дял, за разглежданото тримесечие на 2025 г., е енергията, произведена от фотоволтаици (ФЕЦ) и ветрогенератори (ВяЕЦ), съответно 36,8% и 29,5% (Фиг. 2). На трето място е енергията, произведена от ВЕЦ на язовири - 26,0%.

Данните за нашата страна, за второто тримесечие на 2025 г., не следват тенденцията в Европа - произведената електрическа енергия от възобновяеми източници е 40%, което е с 4% по-малко от количеството за същия период на 2024 г. (ЕМИ, 2025). Наблюдава се спад през 2025 г. на произведената електроенергия от ВЕЦ на язовири и от ВяЕЦ, като основни причини са измененията на климатичните условия в нашата страна.

Представените резултати за света, Европа и България, показват, че с най-голям дял в производството на електрическа енергия от възобновяеми източници са хидроенергийните



Фиг. 2. Дял на възобновяемите източници (%) в общото производство на електрическа енергия в Европа за второто тримесечие на 2025 г.: 1 – вятърна енергия; 2 – слънчева енергия; 3 – енергия на водата (язовири); 4 – геотермална енергия; 5 – горива от възобновяеми източници

(от тях с по-голямо значение са ВЕЦ на язовири), фотоволтаичните и ветрогенераторните системи. Особен интерес представляват последните два вида, защото тяхната инсталирана мощност най-интензивно се увеличава.

Системи за преобразуване енергията от Слънцето

Разработените до момента системи се използват за получаване на топлинна, електрическа и комбинирана (топлинна и електрическа) енергия, като се характеризират с редица предимства (Twidell, J., & Weir, T., 2015):

- процесите на производство на топлинна и електрическа енергия не замърсяват околната среда;
- не се използват движещи се елементи (с изключение на следящите системи), поради което системите не създават шум, вибрации;
- лесно увеличаване мощността на системите - чрез монтаж на допълнителни модули;
- разнообразни възможности за монтаж на модулите – директно върху земна повърхност, върху покриви и фасади на сгради и строителни конструкции, върху транспортни средства;
- относително малки експлоатационни разходи;
- непрекъснато развитие на технологиите, като се повишава ефективността и намалява цената;
- сравнително голяма дълготрайност – (25...30) г.;
- подходящи за захранване с електроенергия на обекти, отдалечени от електрическата мрежа.

Една от най-важните характеристики на преобразувателите е тяхната ефективност, която количествено се определя чрез коефициента на полезно действие (к.п.д.). Неговата най-голяма стойност за фотоволтаичните модули е 47,6 % и се отнася за структури с 4 p-n-прехода и концентратори от Френелови лещи (NREL, 2025). Стойността на същия показател, за комбинираните модули, които преобразуват слънчевата енергия в топлинна и електрическа (PV/T), е (70...85)%. Тази стойност е обща за двата процеса на преобразуване. Фотоволтаичните клетки в комбинираните модули работят по-ефективно (с по-висок к.п.д.), защото се охлаждат по-добре чрез флуида в термосоларната част.

Характерна особеност на преобразувателите на слънчевата енергия е, че стойността на к.п.д. в каталозите на производителите е най-голямата и се отнася за оптимални условия на експлоатация! Условията се определят от интензитета на слънчевата радиация, температурата на модулите и скоростта на вятъра (Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Swaaij, R., & Zeman, M., 2016). В реални условия, системите не работят с най-голяма ефективност и това трябва да се отчита при проектирането и експлоатацията!

Преобразувателите на слънчевата енергия се характеризират и с недостатъци, поради което внедряването им в техническите системи трябва да се осъществява след обстоен анализ. Актуалните предизвикателства пред преобразувателите са:

- работното време е само в светлата част на денонощието;
- силна зависимост от метеорологичните условия – интензитет на слънчевата радиация, температура, скорост на вятъра;
- невъзможност за точно прогнозиране на произвежданата енергия, поради динамика на метеорологичните условия;
- необходимост от подходящо разположение. То определя ефективността на работа и е свързано с ориентация според географските посоки и наклон спрямо земната повърхност за даденото географско положение (за стационарните системи). Системите могат да бъдат разположени върху земен терен, върху покрив или фасада на сгради и строителни конструкции;
- стареене на модулите. Това е непрекъснат процес, който се определя от условията на експлоатация;
- ефективността на най-разпространените фотоволтаични модули е сравнително малка – най-често стойността на к.п.д. е (16...22)%, при **оптимални условия!** К.п.д. **непрекъснато** намалява при експлоатация, поради стареене, вследствие на високи температури, и др. (Коев, К., 2022);
- необходимост от периодично почистване на активните повърхности, за да се отстранят замърсявания (прах, сняг, лед), които намаляват ефективността на работа
- необходимост от съхраняване на енергията, за да се използва в периоди, когато слънчевата радиация е намалена или отсъства (облачно време, нощ). Системите, които се използват за съхраняване на енергия са скъпи;
- необходимост от сложни и скъпи устройства (инвертори) за захранване на консуматори за променливо напрежение;
- голям риск от повреди при природни бедствия: механични деформации поради: резки температурни промени, силен вятър, градушка, земетресения, пожари, мълнии и др.; аварии в електрическата система, които могат да предизвикат пожар и др.
- използват се все още вредни и токсични материали за производството на преобразувателите;
- сравнително сложни, скъпи и не напълно безопасни технологии за рециклиране на фотоволтаични модули.

Изборът на подходящо място за монтаж на соларните инсталации е едно сериозно предизвикателство. Съвременно решение е монтирането на фотоволтаични системи върху земеделски земи. Това е свързано с редица предизвикателства, като промени на микроклимата, биоразнообразието на организмите и почвените условия (ENLAPA, 2025). В доклад на изследователи на горите от Харвардския университет са проучени повече от 500 реализирани проекта за наземни соларни системи в щата Масачузетс, САЩ, за периода (2010...2023) г. (Manion, M. et al., 2023). Установено е, че съоръженията са разположени на 8000 акра (~ 32 400 дка), от които около 60% са били горски площи, но са били разчистени. Проучено е, че ако соларните системи се монтират върху покриви на сгради и на покрити паркинги, ще бъдат постигнати целите за екологично производство на енергия и природата ще бъде защитена.

Изсичането на горите води до необратими климатични промени – намалява способността за задържане на влага, валежите намаляват, почвите ерозират, създават се условия за засушаване, намаляват добивите от селскостопанска продукция, увеличава се риска от продоволствена криза. Променените климатични условия са предпоставка за по-интензивни и по-чести бедствия (урагани, наводнения и др.), които застрашават средата, обитавана от живите организми, и съществуването на самите организми – растения, животни, хора (Ritchie, H. & Rosado, P. 2024).

Известно е, че горската растителност поглъща въглероден диоксид CO_2 и отделя кислород O_2 в големи количества в атмосферата! Нарушаването на този жизненоважен процес е с много опасни последици за организмите.

Системи за преобразуване енергията на вятъра

Използваните съвременни системи генерират основно електрическа енергия. Натрупаният опит и развитието в разработването и експлоатацията на тези системи определят техните характерни предимства (Patel, M., & Beik, O., 2021):

- производство на електрическа енергия без замърсяване на околната среда с вредни вещества;
- съоръженията заемат по-малка площ, при еднаква мощност, в сравнение със соларните системи и конвенционалните електроцентрали за средна мощност;
- терените около ветрогенераторите, ако са подходящи, могат ефективно да се използват за селскостопански цели;
- разработени са нови конструкции на ветрогенератори с по-голяма ефективност:
 без витла - к.п.д. е с до 50% повече от к.п.д. на витловите,
 вибрационни - к.п.д. ~ 30%, но съоръженията заемат по-малка площ;
- намаляване на цената, поради развитие на производствените технологии;
- подходящи за захранване с електроенергия на обекти, отдалечени от електрическата мрежа;
- сравнително голяма дълготрайност, при подходяща експлоатация и поддръжка – (20...30) г. (New Wave, 2025).

Използваните технологични решения не са съвършени и те определят сериозните предизвикателства, които трябва да бъдат преодолявани:

- силна зависимост от метеорологичните условия, поради непостоянни скорост и посока на ветровете през денонощието, сезоните и годината;
- невъзможност за точно прогнозиране на произвежданата енергия, поради динамичните изменения на климатичните условия;
- сравнително ниска стойност на к.п.д. на витловите ветрогенератори ~ (20...50)%;
- силно влияние на взаимното разположение на витловите ветрогенератори върху ефективността на работата им.

Офшорните ветрогенератори по Североизточното атлантическо крайбрежие на САЩ произвеждат с (34...38)% по-малко електроенергия, поради взаимното си влияние (Rosencrans, D. et al., 2024). Ветрогенераторите в един парк, които първи контактуват с вятъра, преобразуват по-голяма част от неговата енергия. Въздушното течение зад тези генератори се характеризира с по-малка енергия и с по-голяма турбулентност. Това течение не е подходящо за работа на ветрогенераторите, които са разположени зад първите (Stevens, R., Gayme, D., & Meneveau, C., 2015).

- скъпи съоръжения;
- скъпа поддръжка;
- необходимост от съхраняване на енергията;
- неблагоприятни екологични последици.

Работата на ветрогенератори с въртящи елементи застрашава различни живи организми - насекоми, птици, прилепи, морските организми (при офшорните системи), хората. Причините са: промени на въздушни течения и на микроклимата; излъчват се шумови емисии, а създаваните електромагнитни полета влияят неблагоприятно на организмите, на комуникационни и навигационни системи. Ветрогенераторите не са подходящи за изграждане в близост до и в населени места (NOAA Fisheries, Baldwin, B. 2023, MEERE ONLINE, 2025, UNEP-WCMC, 2024, Reusch, C. et al., 2023, Scholz, C., Klein, H., & Voigt, C., 2025).

- голям риск от повреди при природни бедствия и аварии;
- сравнително сложни, скъпи и не напълно безопасни технологии за рециклиране.

Системите с възобновяеми енергийни източници навлизат все по-широко в нашия свят, а ефективното и безопасното им продължително използване изисква да се провеждат задълбочени проучвания. Изграждането на тези и други системи в Европа са изследвани и анализирани в трансграничния проект "От зелено към сиво", осъществен от всекидневника "Гардиън" (Великобритания), организация Arena for Journalism in Europe (Arena), Норвежкия институт за изследване на природата (Nina), норвежката телевизия NRK и други медии от 11 държави (Sentek, Z., Prtoric, J., Sheffield, H., & Salzenstein, L. 2025). Проектът изследва сателитни снимки на 30

държави и е установено, че за периода (2018...2023) г. в Европа общо около 1500 km² земя годишно се преобразува. В тази обща площ се включват природни земи 900 km² и земеделски 600 km². Предназначението на тези терени е трайно променено, поради строителство, включително на съоръжения за генериране на енергия от ВЕИ. Един пример от представения проект е изграждането на ветрогенератори в планината Вермио (Северна Гърция), която по-рано е била обявена от националното правителство за защитена територия.

Подобни проблеми със застрояване и промяна на екосистемите са наблюдавани и в Калифорния, САЩ (Jackson, K., & Winegarden, W., 2025).

Изгражданите големи системи за използване енергията на възобновяеми източници е необходимо да бъдат интегрирани в техническата инфраструктура – енергийните системи. Характерна особеност на ФЕЦ и ВеЕЦ е, че тяхното производство е непостоянно във времето и силно зависи от метеорологичните условия, т.е. те не могат да се управляват и регулират ефективно (за разлика, например, от ВЕЦ на язовири, ТЕЦ и други подобни маневрени системи). По тази причина ФЕЦ и ВеЕЦ не се използват като основни генериращи източници в системите.

Сложните процеси по интегрирането на уредби с ВЕИ в енергийните системи и управлението им са много голямо предизвикателство за устойчивостта на системите. Те остават все още уязвими, независимо от прилаганите високотехнологични решения за наблюдение, контрол и управление. Актуален пример е аварията от 28.04.2025 г., (12:30...12:35) h, при което настъпва тотален срив на електрическите системи на Испания и Португалия. Засегнати са общо около 60 млн. жители, в продължение на часове.

На 3 октомври 2025 г. е представен първи междинен доклад на група от 45 експерти, провеждащи техническото разследване на аварията (ENTSO-E, 2025). Събраната информация обхваща параметри и характеристики на електроенергийните системи и измененията им преди, по време на аварията и след нея. Кратката хронология на някои по-значими събития преди пълното прекъсване на електроснабдяването, е следната:

12:20 h - регистрирани са колебания на честотата на напрежението в обединената европейска електроенергийна система;

12:30 h - съобщено е за прекъсване на работата на ядрен реактор във Франция;

12:32:57 h – изключват се малки генериращи източници с обща мощност 317,3 MW; честотата на захранващото напрежение спада; оперативната стабилност на мрежата се възстановява;

12:33:16 h – изключва се генерираща фотоволтаична система с мощност 582 MW в южна Испания; изключват се ветрогенератори;

12:33:17 h (1,32 s по-късно) – изключва се генерираща фотоволтаична система с мощност 550 MW h at се ветрогенератори; честотата на захранващото напрежение спада под 48 Hz;

12:33:19 h - изключват се генериращи фотоволтаични системи в Испания с обща мощност 1 039 MW, ветрогенератори и електропровод 220 kV;

12:33:23 h – за по-малко от 1 s се изключват три атомни генериращи източника в Испания с обща мощност 3 390 MW, при което не са нарушени условията за безопасност; изключват се два електропровода 400 kV и генериращи фотоволтаични системи в Испания, а също водноелектрически централи в Португалия;

12:33:24 h - изключва се електропровода, който свързва електрическите мрежи на Испания и Франция; електроенергийните системи на Испания и Португалия прекъсват работа (срив); стабилизира се работата на електроенергийната система в континентална Европа.

В продължение на 8 s (12:33:16...12:33:24) h се получава много голям спад в производството на електрическа енергия – изключените генериращи източници са с обща мощност около 9 GW.

Пълното възстановяване на електроснабдяването на всички потребители продължава повече от 24 h. Това е много по-голям период, в сравнение с времето за възстановяване при авария в Нидерландия през 2023 г. Тя продължава средно 22 min и обхваща основно домакинствата и фирми. Сравнени са характеристики на електроенергийните системи на Нидерландия и Испания, за 2024 г., за да се открият причини за аварията в южните страни и да се формулират подходящи решения (Ruiz, P., Hutters, C., & Boer, S., 2025). Анализът показва, че върховият товар на електрическата система на Испания е 2 пъти по-голям от този на Нидерландия, което се обяснява с разликите в броя

на населението и площта на териториите. Испания е инсталирала по-големи генериращи мощности, включително работещи с възобновяеми източници, и произведената електрическа енергия там е почти 2 пъти повече. Забелязват се други две съществени разлики, които определят предпоставките за характера и развитието на аварията в двете страни. Първата е, че общата мощност на инсталираните системи за съхраняване на електрическа енергия в батерии в Нидерландия е 4,17 пъти по-голяма (250 MW), в сравнение с Испания (60 MW). Друга особеност е, че мощността, която могат да пренасят трансграничните електропроводи, свързващи електроенергийната система на Нидерландия със системите на съседните държави, е 48% от върховия товар на системата. В Испания тази мощност е 6 пъти по-малка – 8%. Стойностите показват, че испанската електроенергийна система е със значително по-малки възможности за устойчиво реагиране на критични събития.

Основните изводи от анализа в доклада за аварията в Испания и Португалия (ENTSO-E, 2025) са:

1. Причината за аварията е феномен на каскадно пренапрежение.
2. Събитието е предшествано от две колебания на мощността и честотата в електропреносната мрежа, които довеждат до верижни откази и изключвания на електроцентрали – както топлинни, така и работещи с възобновяеми източници.
3. Част от данните за разследването остават недостъпни, поради отказ на „трети страни“ да ги предадат на испанския оператор на националната електрическа мрежа Red Eléctrica.

Окончателният доклад с анализ на първопричините и препоръки за сигурността на мрежата се очаква да бъде представен през първото тримесечие на 2026 г.

Събраната, обработена и анализирана до момента информация за аварията показва, че в системата не се е осъществил адекватен контрол на напрежението. Други проблеми са сравнително малката инертност на системата и внезапното изключване на големи генериращи мощности.

Решения за устойчивост на системи с възобновяеми източници на енергия

Развитието на съвременните електроенергийни системи е свързано с непрекъснато усложняване, поради изменения на електрическите товари (териториално разпределение, промяна на параметрите и режимите) и необходимост от връзки със съседни системи (Padiyar, K., & Kulkarni, A., 2019, Blakesley, J. et al., 2024).

Едно от основните решения е изграждане на подходяща инфраструктура на системите. Това може да се постигне чрез модернизация, която да отговаря на конкретните особености и предизвикателства. Добре планираната и реализирана модернизация се основава на използване на инвестиции и решения, които ще осигурят гъвкавост и устойчивост на системите при критични събития.

Системите с интегрирани съвременни технически средства за прецизен контрол и управление на измененията на напрежението и на други параметри са по-устойчиви на смущаващи въздействия и в тях по-трудно възникват аварии.

Важно решение за качествено управление на системите е създаването и използването на точни прогнози за измененията на генерираната електрическа енергия и на електрическите товари.

Друго решение за повишаване устойчивостта на системите е осигуряване на необходимата инертност. Това може да се реализира чрез системи за съхраняване на енергия, чрез генериращи източници с подходящи параметри, чрез интерконекторни връзки с други системи. Комбинирането на тези варианти е с по-голям ефект, отколкото използването на само един от тях.

Съвременното решение за повишаване устойчивостта на системите, на което се обръща все по-голямо внимание, е използване на съоръжения за съхраняване на произведената електрическа енергия (Twidell, J., & Weir, T., 2015, Titirici, M. et al., 2024). Непостоянният работен режим на голяма част от генераторните системи, използващи възобновяеми източници, може да се стабилизира чрез подходящи методи и системи. Някои от тях са:

- Акумулаторни батерии;
- Суперкондензатори;
- Системи за получаване на сгъстен въздух и приложението му;
- Системи за получаване на водород и използването му във водородни клетки;

- Помпено-акумулиращи водноелектрически централи (ПАВЕЦ);
- Системи за преобразуване и акумулиране на електрическата енергия в механична чрез маховици;
- Термални, електрохимически и химически системи и др.

В нашата страна, на 22.05.2025 г., е открит Индустриален парк "Балкан" край гр. Ловеч, който е най-голямата система за съхраняване на електроенергия в Европа, с общ капацитет 500 MWh (Mediarool, 2025). Съоръжението е съставено от 111 литиево-желязно-фосфатни (LiFePO_4 или LFP) батерии в 16 модула, всеки с капацитет за съхраняване на енергия 31,3 MWh и мощност 7,8 MW. Времето за всяко зареждане и разреждане на системата е 4 h. Изборът на батериите е основан на безспорните им предимства (Ecoflow, 2024, Gaur, A., Sharma, A., & Arya, A., 2022):

- високо работно напрежение. Това позволява на системата да работи с по-малки работни токове, което изисква по-малки сечения на проводниците, и се реализира икономия на инвестиции;
- висока енергийна плътност. Този показател определя количеството електрическа енергия, която може да се съхрани в единица маса или обем. Тя е (90...120) Wh/kg и е по-малка от тази на Li-Ion-батерии (100...265) Wh/kg;
- продължителен експлоатационен срок. Той се определя от броя на циклите заряд-разряд и е няколко хиляди, за разлика от няколко стотици при Li-Ion-батерии;
- по-малък риск от пожар, в сравнение с други типове Li-батерии;
- ниска скорост на саморазреждане;
- по-добър работен температурен диапазон: $(-20...+60)^{\circ}\text{C}$, а за Li-Ion-батерии е по-тесен и с по-висока долна температура - $(0...+45)^{\circ}\text{C}$;
- отсъства мемори ефект. Той се изразява в това, че капацитетът на батерията намалява, ако тя многократно се зарежда преди да е била напълно разреждана.

Системите за съхраняване на електрическа енергия, изградени с LFP-батерии, могат да се експлоатират продължително ефективно и безопасно, ако се вземат под внимание техните недостатъци:

- относително висока цена;
- необходимост от климатични системи за поддържане на определени работни условия, за да се осигури по-дълъг експлоатационен период;
- отделяне на силно токсични вещества при пожар;
- ограничен брой цикли заряд-разряд;
- технологията на рециклиране не е достатъчно ефективна.

Един от най-ефективните методи за съхраняване на големи количества енергия е чрез т.нар. помпено-акумулиращи водноелектрически централи (ПАВЕЦ), като к.п.д. най-често е (70...85)% (Sahoo, U., 2021, Twidell, J., & Weir, T., 2015). Характерното за тези съоръжения е, че те работят в затворен цикъл, т.е. използва се определено количество вода, пренасяно между два басейна, разположени на различни височини. При необходимост от производство на електрическа енергия, водата от по-високо разположения басейн (горен изравнител) се пуска и протича към по-ниско разположения басейн (долен изравнител). При това движение, водата задвижва турбини, които са свързани с генератори. Връщането на водата в горния басейн се осъществява от генераторните агрегати, които преминават в помпен режим. Това е ефективно, когато електрическата мрежа не е много натоварена.

В нашата страна са изградени две подобни съоръжения ПАВЕЦ: „Белмекен“ и „Чаира“ в планината Рила (Фиг. 3). Втората е най-голямата подземна електроцентрала на Балканския полуостров, разположена под язовир „Белмекен“ (NEK EAD). Той е горният изравнител, а долният изравнител – язовир „Чаира“. В ПАВЕЦ „Чаира“ са инсталирани 4 хидроагрегата с обща мощност 864 MW в генераторен режим и 788 MW в помпен. Хидроагрегат №2 на ПАВЕЦ „Чаира“ е ремонтиран и пуснат в експлоатация в края на



Фиг. 3. Язовир „Белмекен“ (Carmap).

2024 г., като максималната му мощност в генераторен режим е 210 MW, а в помпен - 197 MW. В ПАВЕЦ „Белмекен“ са инсталирани 5 хидроагрегата с обща мощност 373,5 MW в генераторен режим и 104 MW в помпен. Само 2 от агрегатите са обратими - работят в генераторен или в помпен режим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Електроенергийните системи, в които се използват източници на възобновяема енергия, трябва да отговарят на най-високите изисквания за ефективност и безопасност, като реализират определени комплексни решения:

1. Повишаване ефективността на системите за преобразуване енергията на ВЕИ.
2. Прилагане на съвременни ефективни и екологично безопасни технологии за изграждане, експлоатация и рециклиране на системите с ВЕИ.
3. Използване на ефективни и екологично безопасни системи за съхраняване на произведената електрическа енергия.
4. Повишаване устойчивостта на електроенергийните системи, при бързо нарастващия дял на ВЕИ и трансграничен обмен на електрическа енергия.

REFERENCES

- Baldwin, B. (2023). Offshore Wind Farms – The Impacts. Australian Fishing Trade Association (AFTA). URL: <https://afta.net.au/offshore-wind-farms-the-impacts/> (Accessed on 15.10.2025).
- Blakesley, J. et al. (2024). Roadmap on established and emerging photovoltaics for sustainable energy conversion. J. Phys. Energy 6 041501. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7655/ad7404> (Accessed on 15.10.2025).
- Carmap. (2025). The state of dams in Bulgaria. Belmeken Dam. (*Оригинално заглавие: Състоянието на язовирите в България. Язовир Белмекен*), URL: <https://carmap.bg/reservoirs/belmeken> (Accessed on 14.10.2025).
- Climate Change Laws of the World. European Union. URL: <https://climate-laws.org/geographies/european-union> (Accessed on 15.10.2025).
- Ecoflow. (2024). LiFePO4 vs. Lithium Ion Batteries: What's the Best Choice for You? URL: <https://www.ecoflow.com/us/blog/lifepo4-vs-lithium-ion-batteries> (Accessed on 14.10.2025).
- Ember. (2025). Yearly Electricity Data. URL: <https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/> (Accessed on 15.10.2025).
- EMI. (2025). Solar power rose, but renewables' share in Bulgaria's electricity mix fell (*Оригинално заглавие: Слънчевата енергия расте, но дялът на ВЕИ в електроенергийния микс в България*

намалява. ЕМИ (Институт за енергиен мениджмънт). URL: <https://www.emi-bg.com/слънчевата-енергия-расте-но-делът-на-в> (Accessed on 14.10.2025).

EN - <https://nek.bg/index.php/en/our-business/enterprises/dams-cascades-enterprise> (Accessed on 14.10.2025).

Energy Institute. (2025). Statistical Review of World Energy. Share of electricity generated by renewables. URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review/> (Accessed on 15.10.2025).

ENLAPA. (2025). Agri PV disadvantages: challenges and limitations of photovoltaics on agricultural land. ENLAPA - energy land lease. URL: https://www.enlapa.de/en/magazine/agri_pv_disadvantages_germany (Accessed on 14.10.2025).

ENTSO-E. (2025). Grid Incident in Spain and Portugal on 28 April 2025. ICS Investigation Expert Panel, Factual Report. URL: https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/2025/entso-e_incident_report_ES-PT_April_2025_06.pdf (Accessed on 15.10.2025).

European Commission. Europe Climate Law. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en (Accessed on 16.10.2025).

Eurostat. (2025). Solar: main source of EU electricity in June with 22%. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250929-3> (Accessed on 14.10.2025).

Gaur, A., Sharma, A., & Arya, A. (2022). Energy storage and conversion devices. Supercapacitors, Batteries, and Hydroelectric Cells. CRC Press.

IRENA. (2025). Renewable energy statistics. International Renewable Energy Agency (IRENA). URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_DAT_RE_Statistics_2025.pdf (Accessed on 13.10.2025).

Jackson, K., & Winegarden, W. (2025). The Cost of Going Green. How the green energy transition will hurt Californians. Pacific Research Institute. URL: https://www.pacificresearch.org/wp-content/uploads/2025/04/CaliforniaSapped2Study_F_web.pdf (Accessed on 15.10.2025).

Koev, K., (2022). An Investigation of the Energy Efficiency of a Grid Connected Photovoltaic System *Proceedings of 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, 1-4, doi: 10.1109/EEAE53789.2022.9831419.

Lefort, J. S., & Simic, N. (2025). A History of renewable energy. European Investment Bank. URL: <https://www.eib.org/en/essays/history-renewable-energy> (Accessed on 13.10.2025).

Manion, M., Thomson, J. R., Pickrell, K., Lee, L., Ricci, H., Collins, J., Plisinski, J., Jones, R., Kwok, G., Powell, D., & Rhatigan, W. (2023). Growing Solar, Protecting Nature. Mass Audubon and Harvard Forest. DOI:10.5281/zenodo.8403839. URL: <https://storymaps.arcgis.com/stories/932be293f1af43c8b776fdad24d9f071> (Accessed on 13.10.2025).

Mediapool. (2025). The largest electricity storage park in Europe was opened near Lovech (**Оригинално заглавие:** Медианул. (2025). Край Ловеч заработи най-големият парк за съхранение на ток в Европа) URL: <https://www.mediapool.bg/krai-lovech-zaraboti-nai-golemiyat-park-za-sahranenie-na-tok-v-evropa-news371494.html> (Accessed on 16.10.2025).

MEERE ONLINE. (2025). Impact of offshore wind farms. Das Informationsportal der Deutschen Meeresforschung (MEERE ONLINE), URL: <https://www.meere-online.de/en/topics/human-use-of-the-ocean/translate-to-english-fokus-offshore-windparks> (Accessed on 15.10.2025).

NEK EAD. Hydro Power Plants (HPP) Enterprise. Plants. (**Оригинално заглавие:** HEK. Предприятие БЕЦ. Централи, URL: <https://nek.bg/vec/index.php/bg/za-nas/centrali>), URL: EN - <https://nek.bg/index.php/en/our-business/enterprises/hydro-power-plants-enterprise>

New Wave. (2025). Understanding the Lifecycle Stages of Offshore Wind Farm Developments, June 24. URL: <https://www.neuwave.co.uk/2025/06/24/understanding-the-lifecycle-stages-of-offshore-wind-farm-developments/> (Accessed on 16.10.2025).

NOAA Fisheries. (2025). Offshore Wind Energy: Assessing Impacts to Marine Life. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA Fisheries), URL: <https://www.fisheries.noaa.gov/topic/offshore-wind-energy/assessing-impacts-to-marine-life> (Accessed on 14.10.2025).

NREL. (2025). Best Research-Cell Efficiency Chart. National laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (NREL). URL: https://www.nrel.gov/images/libraries/pv-images/cellpveff250701.webp?sfvrsn=c74db91a_5 (Accessed on 16.10.2025).

Our World in Data 1. (2025). Global temperature anomalies by month. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/global-temperature-anomalies-by-month> (Accessed on 15.10.2025).

Our World in Data 2. (2025). Share of electricity generation from fossil fuels, renewables and nuclear, world. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-fossil-renewables-nuclear-line> (Accessed on 15.10.2025).

Padiyar, K., & A. Kulkarni. (2019). Dynamics and control of electric transmission and microgrids. IEEE Press, Wiley.

Patel, M., & Beik, O. (2021). Wind and Solar Power Systems. Design, Analysis, and Operation. Third edition. CRC Press.

Reusch, C., Paul, A., Fritze, M., Kramer-Schadt, S., & Voigt, C. (2023). Wind energy production in forests conflicts with tree-roosting bats. *Current Biology*; DOI: [10.1016/j.cub.2022.12.050](https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.12.050) URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096009822201987X?via%3Dihub> (Accessed on 15.10.2025).

Richmond Vale Academy. (2022). The Second Industrial Revolution: The Technological Revolution. URL: <https://richmondvale.org/second-industrial-revolution/> (Accessed on 15.10.2025).

Ritchie, H., & Rosado, P. (2024). Is the number of natural disasters increasing? Ember - Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/disaster-database-limitations> (Accessed on 14.10.2025).

Rosencrans, D., Lundquist, J. K., Optis, M., Rybchuk, A., Bodini, N., & Rossol, M. (2024). Seasonal variability of wake impacts on US mid-Atlantic offshore wind plant power production. *Wind Energy Science*, 9 (3): 555 DOI: [10.5194/wes-9-555-2024](https://doi.org/10.5194/wes-9-555-2024) URL: <https://wes.copernicus.org/articles/9/555/2024/> (Accessed on 16.10.2025).

Ruiz, P., Hutter, C., & Boer, S. (2025). Facts and lessons learned from the iberian blackout. Rabobank. URL: <https://www.rabobank.com/knowledge/d011479255-facts-and-lessons-learned-from-the-iberian-blackout> (Accessed on 15.10.2025).

Sahoo, U. (2021). Energy Storage. John Wiley & Sons, Inc., Scrivener Publishing LLC.

Scholz, C., Klein, H., & Voigt, C. (2025). Wind turbines displace bats from drinking sites. *Biological Conservation*; 302: 110968 DOI: [10.1016/j.biocon.2025.110968](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.110968) URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320725000059?via%3Dihub> (Accessed on 15.10.2025).

Sentek, Z., Prtoric, J., Sheffield, H., & Salzenstein, L. (2025). How Europe is squandering the little nature it has left. Project Green to grey. URL: <https://greentogrey.eu/> (Accessed on 15.10.2025).

Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Swaaij, R. & Zeman, M. (2016). Solar energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. UIT, Cambridge Ltd., England.

Stevens, R., Gayme, D., & Meneveau, C. (2015). Effects of turbine spacing on the power output of extended wind-farms. *Wind Energy*, 19. DOI: 10.1002/we.1835, URL: https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6913515/Stevens_et_al-2015-Wind_Energy.pdf (Accessed on 15.10.2025).

Titirici, M. et al. (2024). 2024 roadmap for sustainable batteries. *J. Phys. Energy* 6 041502. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7655/ad6bc0> (Accessed on 15.10.2025).

Twidell, J., & Weir, T. (2015). Renewable Energy Sources. 3ed. Routledge, Taylor & Francis Group.

UNEP-WCMC. (2024). Offshore energy and migratory species. Cambridge, UK. URL: https://resources.unep-wcmc.org/products/WCMC_RT590 (Accessed on 15.10.2025).

UNFCCC. Documents. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), URL: <https://unfccc.int/documents> (Accessed on 15.10.2025).