

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԱՎՈՅԱՆ ՌՈՄԻԿ ՀՈՎՀԱՆՆԵՍԻ

**ՋՐԱԾՆԱՅԻՆ ԿՈՒՏԱԿԻԶ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ԱՐԵՎԱՅԻՆ
ԿԱՅԱՆԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Ե.14.04 – «Վերականգնվող և այլընտրանքային էներգիայի աղբյուրներով
էներգետիկ կայանքներ» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների
թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2025

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

АВОЯН РОМИК ОГАННЕСОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ С
КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ВОДОРОДНОГО НАКОПИТЕЛЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.14.04 – “Энергетические установки на основе возобновляемых и
альтернативных источников энергии”

ЕРЕВАН 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի (ՀԱՊՀ) գիտական խորհրդում:

Գիտական ղեկավար՝

Ֆ.-մ.գ.դ. Ժողենք Ռեթևոսի Փանոսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.դ. Ռուբեն Ռաֆայելի Վարդանյան

տ.գ.թ. Միքայել Գեորգիի Պիրադյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

**«Էներգետիկայի գիտահետազոտական
ինստիտուտ» ՓԲԸ**

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. հունվարի 26-ին, ժամը 12⁰⁰-ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող ՀՀ ԲԿԳԿ-ի 038 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ 0009, ք. Երևան, Տերյան փ., 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2025թ. դեկտեմբերի 25-ին:

038 Մասնագիտական խորհրդի գիտական
քարտուղար, տ.գ.դ.



Ս.Խ. Խուդավերդյան

Тема диссертации утверждена ученым советом Национального политехнического университета Армении (НПУА).

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Жозеф Ретевосович Паносян

Официальные оппоненты:

д.т.н. Рубен Рафаелович Варданян

к.т.н. Микаел Георгиевич Пирадян

Ведущая организация:

**ЗАО “Научно-исследовательский
институт энергетики”**

Защита диссертации состоится 26-го января 2026 г. в 12⁰⁰ часов на заседании Специализированного совета КВОН РА 038, действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 25-го декабря 2025г.

Ученый секретарь Специализированного
совета 038, д.т.н.



С.Х. Худавердян

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Արենախոսության թեմայի արդիականությունը: Ժամանակակից էներգետիկական համակարգերը կանգնած են գլոբալ բնույթի երկու հիմնական մարտահրավերի առջև: Մի կողմից՝ աշխարհի մի շարք տարածաշրջաններում բնակավայրերը զուրկ են էլեկտրական ցանցերի հասանելիությունից, իսկ մյուս կողմից՝ հանածո վառելիքների ինտենսիվ օգտագործումը հանգեցնում է ածխածնային արտանետումների աճին, կլիմայական փոփոխություններին և բնապահպանական ռիսկերի խորացմանը: Այս պայմաններում ամենաարդյունավետ լուծումներից է վերականգնվող էներգիայի աղբյուրների (ՎԷԱ) կիրառումը, այդ թվում՝ արևային ֆոտովոլտային (ՖՎ) և ջրածնային տեխնոլոգիաների միջոցով:

Արևային էներգետիկան համարվում է վերականգնվող էներգետիկայի զարգացման ամենահեռանկարային ուղղություններից մեկը՝ շնորհիվ իր անսպառ պաշարների, տեխնոլոգիական հասունության և արտադրության ծախսերի շարունակական նվազման: Այնուամենայնիվ, արևային էներգիան էլեկտրականի փոխակերպման ժամանակավոր և սեզոնային անկայունությունը խոչընդոտ է էներգամատակարարման հուսալիության համար: Արդյունավետ լուծում է գեներացված էներգիայի կուտակիչների ներդրումը, որոնք հնարավորություն են տալիս՝ հավասարակշռելու արտադրությունն ու սպառումը:

Վերջին տարիներին որպես երկարաժամկետ էներգակիր առանձնահատուկ ուշադրության է արժանացել ջրածինը: Ջրի էլեկտրոլիզի կամ էկզոթերմային տրոհման միջոցով ստացվող ջրածինը բնութագրվում է մթնոլորտային չեզոքությամբ, բարձր մաքրությամբ և վերականգնվող բնույթով, իսկ դրա հետագա օգտագործումը վառելիքային տարրերում (ՎՏ) ապահովում է մաքուր էլեկտրաէներգիա՝ առանց այրման գործընթացների:

ՖՎ և ջրածնային տեխնոլոգիաների համակցումը ձևավորում է նոր սերնդի ինքնավար էներգամատակարարման համակարգեր, որոնք ունակ են՝ լիարժեքորեն բավարարելու մեկուսացված կամ միասնական էլեկտրական ցանցերից հեռավոր օբյեկտների էներգետիկ պահանջարկը: Հայաստանի պայմաններում նման համակարգերի ներդրումը կարևոր է հատկապես լեռնային բնակավայրերի և ցածր ենթակառուցվածքային մատչելիությամբ տարածքների կայուն զարգացման, էներգետիկ անվտանգության բարձրացման և հանածո վառելիքներից կախվածության նվազեցման տեսանկյունից:

Համապատասխան գրականության վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ թե՛ ՖՎ, և թե՛ ջրածնային տեխնոլոգիաները մանրամասն ուսումնասիրված են՝ ներառյալ դրանց կառուցվածքային, ֆիզիկաքիմիական և տեխնիկատնտեսական բնութագրերը: Սակայն այս տեխնոլոգիաների համակցված կիրառման խնդիրները՝ որպես միասնական ինքնավար էներգամատակարարման համակարգ, դեռևս լիարժեքորեն չեն ուսումնասիրվել: Անհրաժեշտ են նոր մեթոդաբանական մոտեցումներ, իրավիճակային վերլուծություններ և կառավարման արդյունավետ լուծումներ՝ ապահովելու համար նման համակարգերի հուսալի և տնտեսականորեն հիմնավորված շահագործումը: Այս առումով ատենախոսության թեման ունի գիտական և կիրառական արդիականություն:

Արենախոսության նպատակը և խնդիրները: Ատենախոսության նպատակն է մշակել և հետազոտել ջրածնային կուտակիչ համակարգին համակցված արևային ֆոտովոլտային էլեկտրակայան (ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ), որը կապահովի էներգիայի շարունակական, հավասարակշռված և արդյունավետ մատակարարում էլեկտրական ցանցերից մեկուսացված օբյեկտներին:

Նշված նպատակին հասնելու համար առաջադրվել են հետևյալ խնդիրները.

1. Վերլուծել ՖՎ էներգիայի կուտակման լուծումների հնարավորությունները՝ ընդգծելով դրանց առավելություններն ու թերությունները, հիմնավորելով ջրածնային տեխնոլոգիաների համակցման նպատակահարմարությունը ինքնավար էներգամատակարարման համակարգերում.

2. Մշակել ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի ընդհանրացված կառուցվածքը և նախագծման մեթոդաբանությունը.

3. Մշակել ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի կառավարման և մոնիթորինգի ալգորիթմ՝ իրական ժամանակում էներգահոսքերի վերահսկման և օպտիմալացման համար.

4. Մշակել Արևին հետևող նոր համակարգ, որը, անկախ եղանակային պայմաններից, ապահովում է հետևող մեխանիզմի թեքման օպտիմալ անկյան որոշումը՝ էլեկտրական էներգիայի արտադրության առավելագույն մակարդակին հասնելու նպատակով.

5. Իրականացնել ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տեխնիկատնտեսական հետազոտություն.

6. Նախագծել, պատրաստել և փորձարկել ջրածնային գեներատորի լաբորատոր նախատիպ:

Հետազոտության մեթոդները: Հետազոտությունը հիմնված է համակարգային վերլուծության, մոդելավորման, տեխնիկատնտեսական հաշվարկների և փորձարարական ուսումնասիրությունների համադրման վրա: ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի արդյունավետությունը գնահատվել է «բեռնվածքը կորցնելու հավանականության» (Loss of Load Probability) և էլեկտրաէներգիայի համահարթեցված արժեքի (ԷՀԱ) ցուցանիշների միջոցով:

Պաշտպանության են ներկայացվում հետևյալ դրոյթները.

1. ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի կառուցվածքային և ֆունկցիոնալ մոդելը, որը ներառում է ՖՎ կայան, լիթիում-իոնային մարտկոց, էլեկտրոլիզ, ջրածնային կուտակիչ (ԶԿ), ջրածնային կոմպրեսոր և ՎՏ՝ ապահովելով կարճաժամկետ և երկարաժամկետ էներգետիկ հավասարակշռություն:

2. ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի կառավարման և մոնիթորինգի ալգորիթմը, որն ապահովում է իրական ժամանակում էներգահոսքերի վերահսկում և համակարգի աշխատանքի օպտիմալացում տարբեր էներգետիկ ռեժիմներում:

3. Արևի շարժմանը երկառնացքանի հետևման հիբրիդային սկզբունքը, որը սենսորների փոխարեն օգտագործում է արևային էլեմենտներից ստացված հզորության արժեքները՝ անկախ եղանակային տվյալներից, ապահովելով Արևին հետևող համակարգի լուսաընդունիչ մակերևույթի բարձր ճշգրտությամբ կողմնորոշում:

4. ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տեխնիկական գնահատման մեթոդաբանությունը՝ հաշվի առնելով բաղադրիչների անվանական հզորությունները, արդյունավետությունը, կորուստները, գեներացված էներգիայի ավելցուկը և պակասորդը, ինչպես նաև տարվա ընթացքում շահագործման տևողությունը:

5. ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տնտեսական հիմնավորման մեթոդաբանությունը՝ ելնելով համակարգի և սահմանային կետում միասնական էլեկտրական ցանցի ընդլայնման ԷՀԱ-ներից:

6. Զրաձնային գեներատորի լաբորատոր նախատիպի կառուցվածքային և աշխատանքային օպտիմալ պարամետրերը, որոնք սահմանվել են փորձարարական պարամետրային հետազոտությունների հիման վրա:

Արենախոսության գիտական նորույթը.

1. Մշակվել են ինքնավար ՋԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի կառուցվածքային և ֆունկցիոնալ մոդել, համակարգի կառավարման և մոնիթորինգի ալգորիթմ, որն ապահովում է էներգիայի շարունակական և հավասարակշռված մատակարարում տարբեր ժամանակային ռեժիմներում:

2. Մշակվել է Արևի շարժմանը երկու առանցքներով հետևող հիբրիդային համակարգ, որն օգտագործում է Arduino UNO միկրոկոնտրոլեր և հիբրիդային ալգորիթմ, որի միջոցով հնարավոր է օրվա ցանկացած պահին գտնել համակարգի՝ թեքվածության առավելագույն հզորությունն ապահովող անկյունը՝ անկախ եղանակային պայմաններից:

3. Հայաստանի օրինակով իրականացվել է ինքնավար ՋԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տեխնիկատնտեսական հետազոտություն, որը հնարավորություն է տալիս ուսումնասիրվող օբյեկտի դեպքում գնահատել ինքնավար համակարգի տարեկան էներգամատակարարման ծավալը՝ ապահովելով էներգետիկ հավասարակշռության պահպանման և «բեռնվածքը կորցնելու հավանականության» բացառման պահանջները և գնահատել տնտեսական արդյունավետությունը միասնական էլեկտրական ցանցի ընդլայնման համեմատությամբ՝ հիմնվելով ինքնավար համակարգի և սահմանային կետում միասնական էլեկտրական ցանցի ընդլայնման էՀԱ-ների վրա:

4. Մշակվել և փորձարկվել է այլումինե խթանիչով աշխատող դյուրակիր ջրածնային գեներատորի լաբորատոր նախատիպ, որը հիմնված է ջրի մոլեկուլների էլեկտրոմային տրոհման գործընթացի վրա հիմնային լուծույթում: Փորձարարական հետազոտությամբ սահմանվել են ջրածնի առավել արդյունավետ գեներացման ռեժիմները:

Ներկայացված գիտական արդյունքները ձևավորում են ՖՎ և ջրածնային տեխնոլոգիաների համակցման նոր գիտամեթոդական հիմքեր, որոնք կարող են օգտագործվել ինքնավար էներգամատակարարման համակարգերի նախագծման, մոդելավորման և օպտիմալ կառավարման ժամանակ:

Արենախոսության կիրառական նշանակությունը: Մշակված ՋԿՀՀԱՖՎԷԿ-ը կարող է կիրառվել միասնական էլեկտրական ցանցից հեռավոր և մեկուսացված օբյեկտների ինքնավար էներգամատակարարման դեպքում, որտեղ էլեկտրական ցանցի ընդլայնումը տեխնիկապես իրագործելի չէ կամ տնտեսապես ոչ արդյունավետ: Համակարգը հնարավորություն է տալիս ապահովել հավասարակշռված և զրոյական արտանետումներով էներգամատակարարում: Աշխատանքի արդյունքները կարող են կիրառվել ինչպես համակցված, այնպես էլ առանձին արևային և ջրածնային տեխնոլոգիաների նախագծման ու շահագործման գործընթացներում:

Արենախոսության արդյունքների հրապարակումները.

Ատենախոսության հիմնական դրույթները հրատարակված են 8 գիտական աշխատանքում, որոնցից 5-ը՝ առանց համահեղինակների:

Արենախոսության կառուցվածքը և ծավալը: Ատենախոսությունը ներառում է ներածություն, չորս գլուխ, եզրակացություններ, 86 անուն գրականության ցանկ, հավելված, պարունակում է 31 նկար, 4 աղյուսակ և շարադրված է 116 համակարգչային էջի վրա:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆ ԴԱՎՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածության մեջ հիմնավորված են ատենախոսության թեմայի արդիականությունը, նպատակն ու խնդիրները, գիտական նորոյթը, կիրառական նշանակությունը:

Առաջին գլխում վերլուծված են գլոբալ էներգետիկ համակարգի հիմնական մարտահրավերները, վերականգնվող էներգիայի, հատկապես արևայինի, զարգացման միտումներն ու տեխնոլոգիական հիմքերը, ինչպես նաև էներգիայի կուտակման համակարգերի դերը կայուն էներգամատակարարման համար:

Ներկայացված են վիճակագրական տվյալներ, որոնք ցույց են տալիս համաշխարհային էլեկտրաէներգիայի պահանջարկի աճը և արտադրության կառուցվածքում հանածո վառելիքի գերակշռող դերը: Մանրամասն քննարկվել են ժամանակակից էներգետիկական համակարգերի առջև ծառացած երկու հիմնական գլոբալ մարտահրավերները: Առաջինն էլեկտրաէներգիայի հասանելիության խնդիրն է, իսկ երկրորդը՝ էներգետիկայի բացասական էկոլոգիական ազդեցությունները: Այս երկու հիմնական մարտահրավերների համատեղ լուծման հուսալի ուղի է ՎԷԱ-ի արդյունավետ կիրառումը: Վերլուծվել է ՎԷԱ-ի զարգացման դինամիկան, ներառյալ նոր տեղադրված հզորությունների աճի տեմպերը, ինքնաթեքի կտրուկ նվազումը և ներդրումների կառուցվածքը:

Գլխում մանրամասն քննարկվել է Հայաստանի էներգետիկական համակարգի իրավիճակը: Ներկայացված են արտադրության կառուցվածքը, հիդրոէներգետիկայի սահմանափակ ներուժը և հողմային էներգետիկայի զարգացման տնտեսական, տեխնիկական, բնապահպանական և սոցիալական բնույթի խոչընդոտները: Ցույց է տրվել պետական խթանիչ մեխանիզմների դերը ՎԷԱ-ի զարգացման գործում:

Հատուկ ուշադրություն է դարձվել արևային էներգետիկայի համաշխարհային զարգացման միտումներին և Հայաստանում արևային բարձր ներուժին: Ներկայացված են երկրում գործող և նախատեսվող արևային կայանների հզորությունները, ինչպես նաև ազգային ռազմավարական նպատակները: Միաժամանակ, ներկայացվել են արևային կայաններով էներգիայի գեներացման հետ կապված խնդիրները՝ արտադրության անկայունություն, սպառման հետ անհամապատասխանություն և ցանցի կառավարման բարդություններ:

Դիտարկվել են արևային էներգիայի փոխակերպման երկու հիմնական տեխնոլոգիաների՝ ՖՎ և կոնցենտրատորային ֆոտովոլտային (ԿՖՎ) կերպափոխիչների աշխատանքի սկզբունքներն ու համեմատական բնութագրերը:

Իրականացվել է էներգիայի կուտակման տարբեր համակարգերի (մեխանիկական, էլեկտրական, էլեկտրաքիմիական) համապարփակ վերլուծություն: Դիտարկվել են լիթիում-իոնային մարտկոցները՝ որպես ինքնավար արևային համակարգերում կարճաժամկետ կուտակման առավել հարմար լուծում: Սակայն դրանք ունեն սահմանափակումներ երկարաժամկետ և սեզոնային կուտակման խնդիրների դեպքում: Այս համատեքստում որպես այլընտրանքային կուտակման մեթոդ ջրածինը դիտարկվում է խոստումնալից և արդյունավետ լուծում արևային էներգետիկական համակարգերում՝ երկարաժամկետ և սեզոնային էներգիայի կուտակման համար:

Երկրորդ գլուխը նվիրված է ջրածնային տեխնոլոգիաների գիտատեխնիկական հիմքերի համապարփակ վերլուծությանը, որը ներառում է ջրածնի արտադրությունը, կուտակումը և վերափոխումն էլեկտրական էներգիայի:

Ուսումնասիրվել է կանաչ ջրածնի արտադրության հիմնական գործընթացը՝ ջրի էլեկտրոլիզը, որն իրականացվում է երկու հիմնական տեխնոլոգիայով՝ ալկալային ջրի էլեկտրոլիզի (ԱՋԷ) և պրոտոնափոխանակային թաղանթով էլեկտրոլիզի (ՊՓԹԷ): Ներկայացվել են դրանց աշխատանքի ֆիզիկաքիմիական սկզբունքները, կառուցվածքային բաղադրիչները և կատալիզատորները: Վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ ԱՋԷ-ն, օգտագործելով մատչելի նյութեր (օրինակ՝ նիկել-երկաթ և նիկել-մոլիբդեն համաձուլվածքներ), խոշորամասշտաբ արտադրության դեպքում առավել տնտեսապես իրագործելի տարբերակ է: Սակայն այն ունի տեխնիկական սահմանափակումներ՝ կապված հոսանքի համեմատաբար ցածր խտության (0.1–0.5 Ա/սմ²) և գազերի խառնման դիսկի հետ: ՊՓԹԷ-ն, իր հերթին, ապահովում է ջրածնի բարձր մաքրություն և արդյունավետություն, հոսանքի բարձր խտություն (2 Ա/սմ²), ինչպես նաև ունի կոմպակտ կառուցվածք և դինամիկ աշխատանքի լավ հարմարվողականություն: Թերություններից է թանկարժեք կատալիզատորների (պլատին, իրիդիումի օքսիդ) օգտագործման անհրաժեշտությունը:

Քննարկվել են ջրածնի կուտակման հիմնական տեխնոլոգիաները՝ հեղուկացված, ստորգետնյա, պինդ վիճակում և սեղմված գազային կուտակում: Դրանցից սեղմված գազային ջրածնի կուտակումն առավել հարմար լուծում է՝ ապահովելով բարձր էներգետիկ խտություն և երկարաժամկետ պահպանման հնարավորություն՝ նվազագույն կորուստներով:

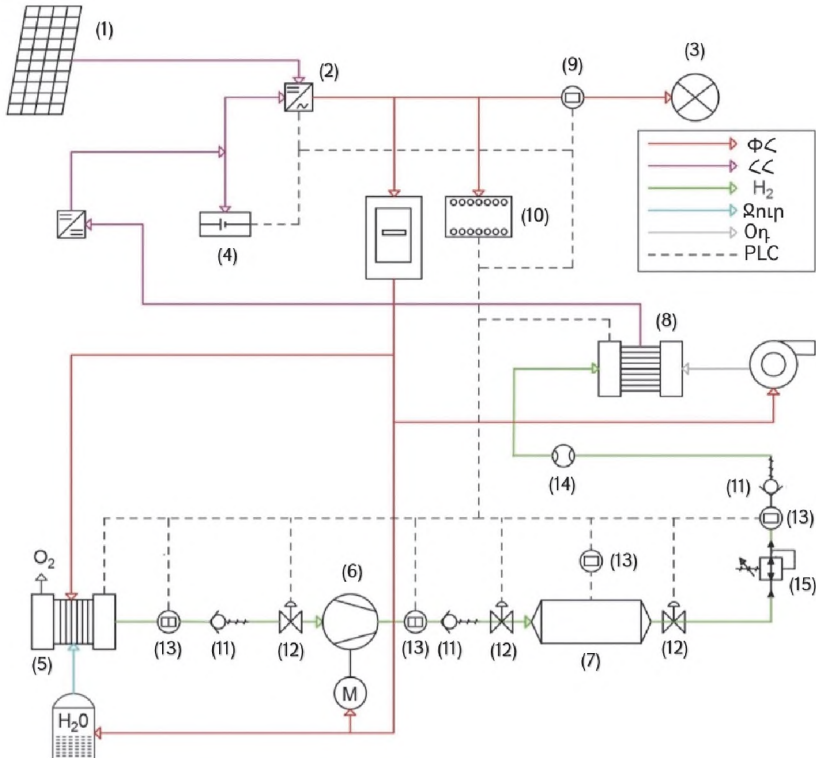
Գլխի եզրափակիչ մասը նվիրված է ՎՏ-երին՝ որպես ջրածնի քիմիական էներգիան էլեկտրականի վերափոխման սարքերի: Ներկայացվել են ՎՏ-երի հիմնական տեսակները, կառուցվածքային բաղադրիչները և աշխատանքի սկզբունքները: Բերված են ալկալային, պինդ օքսիդային, հալված կարբոնատով, ֆոսֆորաթթվային և պրոտոնափոխանակային թաղանթով ՎՏ-երի (ՊՓԹՎՏ) աշխատանքային ջերմաստիճանային միջակայքերը, կատալիտիկ ռեակցիաների առանձնահատկությունները և էներգափոխակերպման արդյունավետության ցուցանիշները: Վերլուծվել են տարբեր տեխնոլոգիաների գործառական առավելությունները և սահմանափակումները: Մասնավորապես, ՊՓԹՎՏ-երն առանձնանում են աշխատանքի ցածր ջերմաստիճանով, բարձր արդյունավետությամբ (40–60%), կոմպակտ կառուցվածքով և արագ գործարկմամբ (մինչև 1 րոպե), ինչը դրանց դարձնում է գերադասելի ինքնավար էներգահամակարգերի համար: Այնուամենայնիվ, նույնիսկ արագ գործարկման այս ՎՏ-երը չեն կարող անմիջապես արձագանքել կտրուկ և կարճատև բեռի տատանումներին: Այս հանգամանքը սահմանափակում է դրանց արդյունավետությունը արագ փոփոխվող դինամիկ բեռների դեպքում: Այդ սահմանափակությունը կարող է արդյունավետորեն հաղթահարվել հիբրիդային էներգահամակարգի համակարգերի միջոցով:

Երրորդ գլխում ներկայացված է ինքնավար արևային-ջրածնային էներգահամակարգի նախագծման մեթոդաբանությունը՝ սկսած կառուցվածքային սխեմայի և կառավարման տրամաբանության մշակումից մինչև արևային ռեսուրսի հավաքագրման արդյունավետությունը բարձրացնող Արևին հետևող համակարգի ստեղծումը:

Մշակվել են ԶԿՀՀԱՖԿԷԿ-ի ընդհանրացված կառուցվածքը և նախագծման մեթոդաբանությունը, որոնք ապահովում են կարճաժամկետ և երկարաժամկետ էներգետիկ հավասարակշռություն:

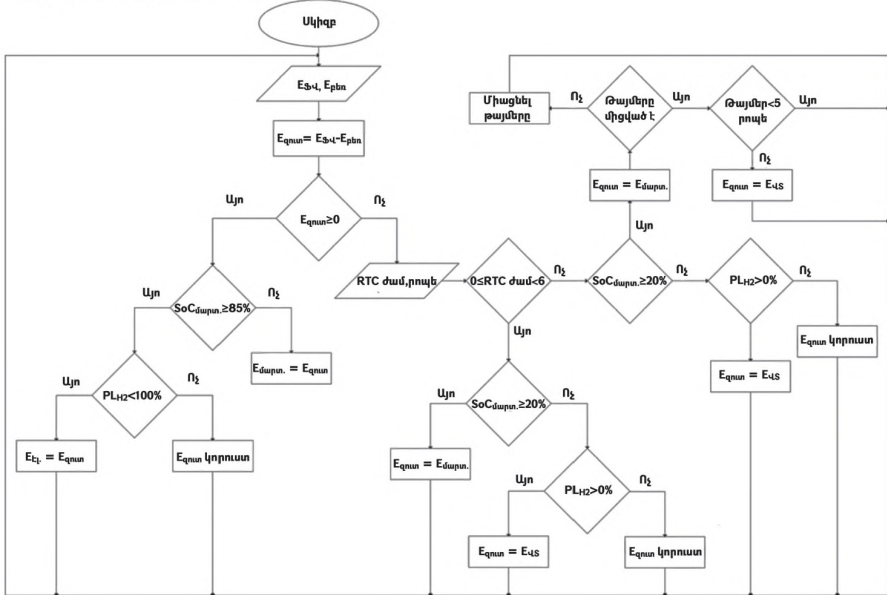
Նկ.1-ում պատկերված են ԶԿՀՀԱՖԿԷԿ-ի հիմնական բաղադրիչները, դրանց տրամաբանական կապը և էներգահոսքերի ուղղությունները:

Համակարգի հիմքում ընկած է (1) ՖՎ վահանակների (ՖՎՎ) խումբը, որով գեներացված հաստատուն հոսանքը (ՀՀ) (2) հիբրիդային ինվերտորի (ՀԻ) միջոցով փոխակերպվում է փոփոխական հոսանքի (ՓՀ) և մնուցում (3) բեռը: Ավելցուկային էներգիան նախ ուղղվում է (4) լիթիում-իոնային մարտկոցների լիցքավորմանը, իսկ դրա լրիվ լիցքավորման դեպքում՝ (5) էլեկտրոլիզի համակարգին: Էլեկտրոլիզի միջոցով առաջացած ջրածինը սեղմման է ենթարկվում (6) ջրածնային կոմպրեսորի միջոցով և կուտակվում է (7) ՋԿ-ում: Համակարգում էներգիայի երկարատև պակասորդի դեպքում կուտակված ջրածինն ուղղվում է (8) ՎՏ, որի միջիոցով արտադրված ՀՀ-ն ՀԻ-ի միջոցով փոխակերպվում է ՓՀ-ի և մնուցում բեռը: (9) խելացի հաշվիչը շարունակաբար վերահսկում և գրանցում է բեռի էներգասպառումը: Էներգիայի կառավարման գործընթացն իրականացվում է (10) ծրագրավորվող տրամաբանական վերահսկիչի (ԾՏՎ) միջոցով, որը հավաքագրում, մշակում և վերլուծում է իրական ժամանակում ստացվող տվյալները համակարգի բոլոր բաղադրիչներից: Գազի հոսքի կառավարումը և շահագործման անվտանգությունն ապահովվում է (11) հետադարձ փականների, (12) էլեկտրամագնիսական փականների, (13) ճնշման տվիչների, (14) զանգվածային ծախսաչափի և (15) ճնշման կարգավորիչի միջոցով:



Նկ. 1. Ինքնավար ՋԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի կառուցվածքային սխեման

Առաջարկվել է ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի կառավարման և մոնիթորինգի ալգորիթմ (նկ. 2), որը ԾՏՎ-ի միջոցով իրական ժամանակում օպտիմալացնում է էներգահոսքերը՝ ապահովելով էներգիայի շարունակական և հավասարակշռված մատակարարում՝ տարբեր ժամանակային ռեժիմներում: Ալգորիթմում ներառված են ՖՎ և ջրածնային տեխնոլոգիաների համակցությամբ համակարգի բաղադրիչների աշխատանքային պարամետրերի վերահսկումը, գեներացված, կուտակված և սպառված էներգիայի հաշվառումը, տվյալների կոդավորումը և տեղեկատվություն հաղորդումը:



Նկ. 2. Ինքնավար ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի էներգիայի կառավարման ալգորիթմը

ԾՏՎ-ն իրականացնում է բեռի սպառման ($E_{բն}$) և ՖՎԿ-ների արտադրած հզորության ($E_{ՖՎ}$) մշտադիտարկում՝ որոշելով էլեկտրաէներգիայի պակասը կամ ավելցուկը: Միաժամանակ վերահսկվում է մարտկոցային կուտակիչի լիցքավորման մակարդակը ($SoC_{մարտ.}$): Երբ $SoC_{մարտ.}$ -ը հասնում կամ գերազանցում է 85 %-ը, և առկա է ավելցուկային էներգիա ($E_{գոտ} > 0$), միացվում է էլեկտրոլիզը՝ ավելցուկը կուտակելու նպատակով: Էլեկտրոլիզը դադարեցնում է աշխատանքը, եթե $SoC_{մարտ.}$ -ը իջնում է 85 %-ից ցածր, եթե մարտկոցի լիցքաթափման հզորությունը գերազանցում է ՖՎԿ-ների արտադրած հզորությանը, և սպառումը գերազանցում է հասանելի էներգիան ($E_{գոտ} < 0$), կամ եթե ջրածնի կուտակիչի մուտքային ճնշումը (PL_{H2}) հասնում է 100 %-ի:

Երբ $E_{գոտ} < 0$, ԾՏՎ-ն օգտագործում է իրական ժամանակի ժամացույցը (real-time clock, RTC)՝ ժամը գրանցելու և որոշելու համար, թե արդյոք բեռնվածքը գտնվում է գիշերային սպասման ռեժիմում: Գիշերային ժամերին (00:00–06:00), եթե $SoC_{մարտ.}$ -ը իջնում է 20 %-ից ցածր, ՎՏ-ն ակտիվացվում է՝ մարտկոցի խորքային լիցքաթափումը կանխելու համար: Յերեկային ժամերին (06:00–00:00), եթե մարտկոցը շարունակաբար լիցքաթափվում է ավելի քան 5

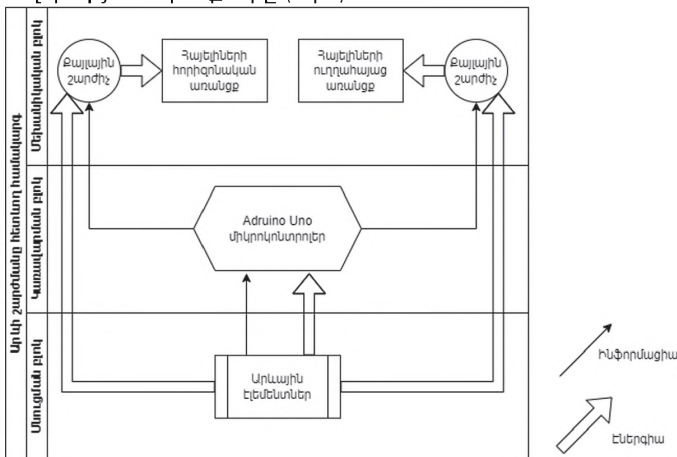
րոպե, ՎՏ-ն սկսում է գործել: Այս ժամանակահատվածը հնարավորություն է տալիս ՎՏ-ին՝ անցնելու աշխատանքային ռեժիմի և տարբերելու երկարատև բեռնվածքները կարճաժամկետ պիկային բեռնվածքներից:

Գլխի եզրափակիչ մասում հիմնավորվում է Արևի շարժմանը հետևող ԿՖՎ համակարգի կիրառման նպատակահարմարությունը՝ սահմանափակ տարածքի պայմաններում օրվա ընթացքում առավելագույն էներգաարտադրություն ապահովելու համար: Ներկայացվում է հետևող համակարգի կառուցվածքային սխեման, որը բաղկացած է խտարարներից, հայելիներից, լուսաէլեկտրական տարրերից, կառավարման միկրոկոնտրոլերից և էլեկտրամեխանիկական քայլային շարժիչներից:

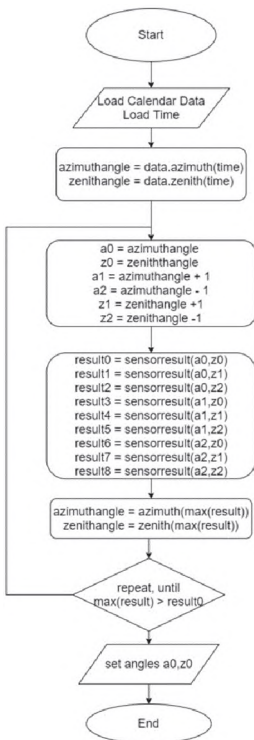
Հետևող համակարգի միացման սխեման բաժանված է երեք պայմանական բլոկների, որտեղ էներգասնուցման բլոկը ծառայում է որպես էներգիայի և տեղեկատվության աղբյուր երկառնացք հետևող համակարգի համար: Արևային էլեմենտներից ստացված էներգիան մատակարարվում է կառավարման բլոկին և քայլային շարժիչներին, որոնք մեխանիկական շարժման միջոցով իրականացնում են հայելիների պտույտը երկու առանցքների շուրջը: Մյուս կողմից՝ արևային էլեմենտներից վոլտմետրի և ամպերմետրի միջոցով չափված հոսանքի և լարման արժեքները փոխանցվում են միկրոկոնտրոլերին, որն այդ տվյալները մշակում է և համապատասխան հրամաններ փոխանցում քայլային շարժիչներին (նկ.3):

Կառավարման բլոկի հիմնական տարր է ընտրվել Arduino UNO միկրոկոնտրոլերը՝ իր պարզ կիրառելիության և արևային էներգետիկայում լայն օգտագործման շնորհիվ: Միկրոկոնտրոլերի մուտքերին միացվում են արևային էլեմենտներից արտադրության ցուցանիշների անալոգային արժեքները, որոնք վերածվում են թվայինի, իսկ ելքային օղակներից միացված քայլային շարժիչները կառավարվում են նախօրոք մշակված ծրագրով:

Մշակվել է Արևի շարժմանը հետևող հիբրիդային համակարգի ալգորիթմ, որտեղ սենսորների փոխարեն օգտագործվում են արևային էլեմենտներից ստացված հզորության արժեքները (նկ.4):



Նկ.3. Արևի շարժմանը հետևող համակարգի միացման սկզբունքային բլոկ-սխեման



*Նկ. 4. Արևի շարժմանը հեղևոտ
հիբրիդային համակարգի
ալգորիթմը*

Որպես հետազոտվող օբյեկտ դիտարկվել է Հանքավան գյուղում տեղակայված հանգստյան տունը, որի տարեկան էներգետիկ պահանջարկի հավասարակշռված բավարարումը ՋԿՀԱՖՎԷԿ-ի միջոցով իրականացվել է՝ ելնելով «բեռնվածքը կորցնելու հավանականության» բացառման պահանջից:

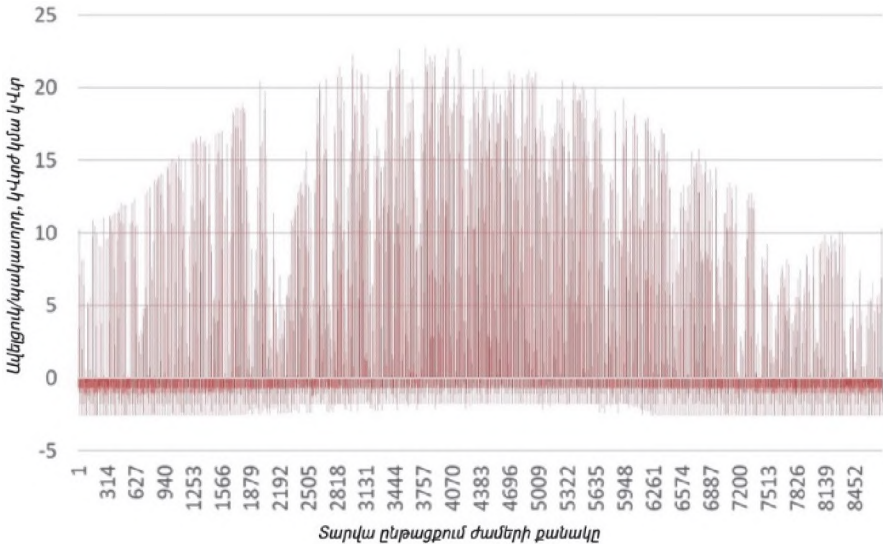
Հաշվակվել են հետազոտվող օբյեկտի էներգասպառիչների ժամային համընկնման գործակիցները, կառուցվել է օբյեկտի բեռնվածության պրոֆիլը, որոշվել են էլեկտրաէներգիայի տարեկան պահանջարկը՝ 10482.8 կՎտ·ժ և աիկային բեռը՝ 2.6 կՎտ: PVGIS գործիքակազմի միջոցով ստացվել են օբյեկտի տեղակայման վայրում արևային ճառագայթման գլոբալ հորիզոնական ինտենսիվության ժամային տվյալները և տարեկան միջին ճառագայթման ինտենսիվությունը՝ 1422 կՎտ·ժ/մ²:

Մշակվել է ՋԿՀԱՖՎԷԿ-ի տարեկան էներգամատակարարման ծավալի գնահատման մոդել՝ ըստ համալրող բաղադրիչների անվանական (դրվածքային) հզորության արժեքների: Մոդելում հաշվի են առնվել դրանց արդյունավետության ցուցանիշները, էներգետիկ կորուստները, գեներացված էներգիայի ավելցուկը և պակասորդը, ինչպես նաև տարվա ընթացքում շահագործման տևողությունը:

Օրվա ցանկացած պահի համակարգը թեքվում է օրացույցով նախատեսված անկյամբ և չափում կատարում: Եթե չափման արդյունքը փոքր է տվյալ աշխարհագրական տեղանքի համար Արևի ուղիղ ճառագայթների դեպքում արտադրված միջին հզորությունից, համակարգը թեքվում է մեկ աստիճանով համապատասխանաբար ազիմուտային և զենիթային անկյուններով և կրկնում չափումը: Եթե չափման արդյունքներից որևէ մեկը մեծ է օրացուցային անկյան չափման արդյունքից, ապա որպես նոր համեմատության արդյունք ընտրվում է մեծ արդյունքը, և գործողությունը կրկնվում է: Այս գործողությունը շարունակվում է առավելագույնը 8 անգամ: Համակարգն օգտագործվում է սարքի աշխատանքում՝ կիրառելով անկյան մեկ աստիճանով փոփոխության քայլեր, ինչի շնորհիվ ալգորիթմի աշխատանքը, կախված եղանակային պայմաններից, տևում է մինչև 5 վայրկյան: Այսպես Արևին հետևող համակարգը օրվա ցանկացած պահին սարքի հայելային համակարգն ուղղում է այն անկյամբ, որով արևային էլեմենտները կարտադրեն առավելագույն էլեկտրական էներգիան:

Չորրորդ գլխում ներկայացված են ՋԿՀԱՖՎԷԿ-ի տեխնիկա-տնտեսական հետազոտությունը և ալյումինե խթանիչով աշխատող դյուրակիր ջրածնային գեներատորի լաբորատոր նախատիպի մշակումը և փորձարկումը:

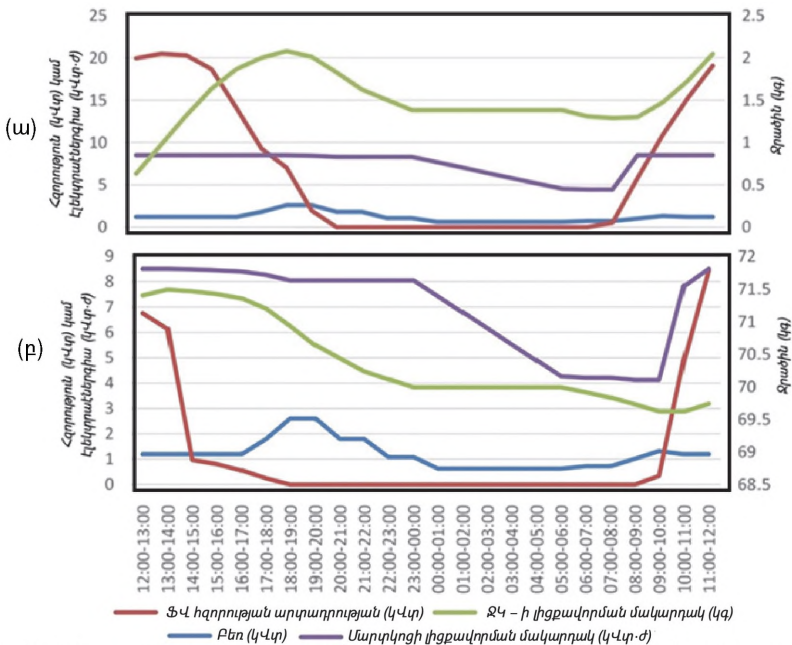
ՖՎՎ-ների անվանական հզորությունը (25 կՎտ) գնահատվել է՝ ելնելով օբյեկտի տարեկան էներգածախսից: Այն վերլուծվել է տարվա ընթացքում ժամային կտրվածքով՝ էներգետիկ ավելցուկի և պակասորդի գնահատման համար (նկ. 5):



Նկ. 5. Ընտրված 25 կՎտ հզորությամբ ՖՎՎ-ների էներգետիկ ավելցուկի և պակասորդի ժամային վերլուծություն

Մարտկոցի ունակությունը՝ 10 կՎտ-ժ, որոշվել է «առավելագույն կուտակային պակասորդի» մեթոդով՝ գումարելով գիշերային (00:00–06:00) և ցերեկային 5-րոպեանոց (06:00–00:00) պակասորդները, որոնք ներկայացված են նկ. 5–ում: Ամեն օրվա սկզբում կուտակային պակասորդը վերադրվել է գրոյի, և հաշվարկը կրկնվել է վերլուծության ամբողջ ժամանակահատվածում՝ 8,760 ժամ: ՎՏ-ի անվանական հզորությունը՝ 3 կՎտ, որոշվել է նկ. 5–ում ցերեկային ժամերին գրանցված պակասորդների վերլուծությամբ՝ հաշվի առնելով մարտկոցի միջոցով առաջին հինգ րոպեների ընթացքում փոխհատուցումը: Էլեկտրոլիզի անվանական հզորությունը՝ 23 կՎտ, սահմանվել է տարվա ընթացքում արձանագրված առավելագույն ավելցուկային հզորության հիման վրա այն պահին, երբ մարտկոցի լիցքավորման մակարդակը հասնում է 85 %-ի: ԶԿ-ի ծավալը՝ 8 մ³ (350 բար ճնշման պայմաններում), որոշվել է ջրածնի արտադրության և սպառման ժամանակային փոփոխությունների ուսումնասիրությամբ՝ գնահատելով առավելագույն կուտակման պահանջվող ծավալը, իսկ կոմպրեսորի հզորությունը գնահատվել է 0.7 կՎտ:

Մշակված էներգիայի կառավարման ալգորիթմի հիման վրա կատարվել է ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի մեկ տարվա շահագործման վերլուծություն: Նկ. 6–ում ներկայացված են ամառային օրվա և ձմեռային վատթարագույն օրվա համար բեռնվածության, ՖՎՎ-ների արտադրած հզորության, մարտկոցի լիցքավորման և ԶԿ-ի էներգիայի մակարդակների պրոֆիլները:



Նկ. 6. Ամառային օրվա (ա) և ձմեռային վաղաշարազույն օրվա (բ) ընթացքում բեռնվածության պահանջարկը (կՎտ), ՖՎԿ-ների արտադրած հզորությունը (կՎտ), մարտկոցի լիցքավորման մակարդակը (կՎտ-ժ) և ՋԿ-ի էներգիայի մակարդակը (կգ)

Վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ ամառային օրվա ընթացքում ՖՎԿ-ների բարձր արտադրողականությունը ձևավորում է էներգիայի ավելցուկ (12:00–19:00), որը նախ ուղղվում է լիթիում-իոնային մարտկոցի լիցքավորմանը մինչև առավելագույն մակարդակը, իսկ դրանից հետո՝ ՊԲԹԷ-ի միջոցով ջրածնի արտադրությանը, ինչի շնորհիվ աճում է ՋԿ-ի էներգետիկ մակարդակը։ Երեկոյան ժամերին (19:00–00:00), երբ ՖՎԿ-ները դադարում են արտադրել, առաջացող էներգետիկ պակասորդը 5 րոպե փոխհատուցվում է մարտկոցով, մինչև ՎՏ-ն անցնում է աշխատանքային ռեժիմի և բեռնվածության սպասարկմանը։ Գիշերային հատվածում (00:00–06:00) բեռնվածությունն ամբողջությամբ մատակարարվում է մարտկոցից, իսկ հաջորդ օրը ՖՎԿ-ների ավելցուկային հզորությունը կրկին ուղղվում է մարտկոցի լիցքավորմանը և ՊԲԹԷ-ի միջոցով ջրածնի արտադրությանը։

Ձմեռային վաղաշարազույն օրվա դեպքում ՖՎԿ-ների արտադրությունը բավարարում է բեռնվածությունը միայն 12:00–14:00 միջակայքում։ Օրվա մնացած ժամերին ՖՎԿ-ների հզորության արտադրությունը պահպանվում է նվազագույն մակարդակով, ինչի հետևանքով անհրաժեշտ է լիթիում-իոնային մարտկոցի մասնակցությունը։ Վերջինս 5 րոպե ապահովում է պահանջվող էներգամատակարարումը՝ փոխհատուցելով էլեկտրաէներգիայի պակասորդը, մինչև ՎՏ-ն անցնում է աշխատանքային ռեժիմի և ապահովում է բեռնվածության մատակարարումը (14:00–00:00)։ Գիշերային ժամերին (00:00–06:00)

բեռնվածությունը կրկին ամբողջությամբ մատակարարվում է մարտկոցից, իսկ հաջորդ օրը ՖՎՎ-ների ավելցուկային հզորությունը կրկին օգտագործվում է մարտկոցի լիցքավորման և ՊՓԹԷ-ի միջոցով ջրածնի արտադրության համար:

Այսպիսով, տարեկան շահագործման գործընթացի մոդելավորման արդյունքները հաստատում են համակցված համակարգի տեխնիկական կենսունակությունը: Համակարգն ապահովում է էլեկտրաէներգիայի լիարժեք հավասարակշռված մատակարարում՝ ամառային ամիսներին արևային ավելցուկային էներգիան փոխակերպելով ջրածնի, իսկ ձմռանն այն օգտագործելով ՎՏ-ում: Լիթիում-իոնային մարտկոցը գրավում է կարճաժամկետ էներգամատակարարումը գիշերային ժամերին և անցումային ռեժիմներում՝ բարձրացնելով ամբողջ համակարգի էներգամատակարարման հուսալիությունը:

ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տնտեսական գնահատման համար որպես հիմնական ցուցանիշ դիտարկվել է ԷՀԱ-ն, որն օգտագործվել է համակարգի և միասնական էլեկտրական ցանցի ընդլայնման հնարավորությունների համեմատության դեպքում: ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տնտեսական գնահատման ընթացքում հաշվի են առնվել համակարգի բոլոր բաղադրիչների կապիտալ և շահագործման ծախսերը: Հաշվարկների արդյունքում ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի սկզբնական ներդրումային արժեքը կազմել է 143,121 ԱՄՆ դոլար:

Ինքնավար ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի ԷՀԱԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ը հաշվարկվել է հետևյալ բանաձևով.

$$E_{\text{ՀԱ}}^{\text{ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ}} = \frac{\sum_{y=0}^n \frac{(C_{\text{ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ}, y} + O_{\text{ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ}, y})}{(1+r)^y}}{\sum_{y=1}^n \frac{E_{\text{ԵԿ}, y}}{(1+r)^y}}, \quad (1)$$

որտեղ $C_{\text{ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ}, y}$ -ը ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի կապիտալ ծախսերն են տվյալ «y» տարում, $O_{\text{ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ}, y}$ -ը՝ ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի շահագործման ծախսերը տվյալ «y» տարում, n -ը՝ ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի ընդհանուր շահագործման տևողությունը (25 տարի), r -ը՝ գեղջի տոկոսադրույքը, $E_{\text{ԵԿ}, y}$ -ն՝ տվյալ «y» տարում ուսումնասիրության օբյեկտի էլեկտրաէներգիայի պահանջարկը:

Էլեկտրական ցանցի ընդլայնման տնտեսական գնահատման ընթացքում հաշվի են առնվել հետազոտվող օբյեկտի տարածքում բաշխիչ էլեկտրական ցանցի ընդլայնման համար պահանջվող բոլոր բաղադրիչների կապիտալ և շահագործման ծախսերը:

Էլեկտրական ցանցի ընդլայնման դեպքում ԷՀԱ_{ցանց}-ը հաշվարկվել է հետևյալ բանաձևով.

$$E_{\text{ՀԱ}}^{\text{ցանց}} = \frac{\sum_{y=0}^n (C_{\text{ցանց}, y} + O_{\text{ցանց}, y} + EC_y)(1+r)^{-y}}{\sum_{y=1}^n E_{\text{ԵԿ}, y} (1+r)^{-y}}, \quad (2)$$

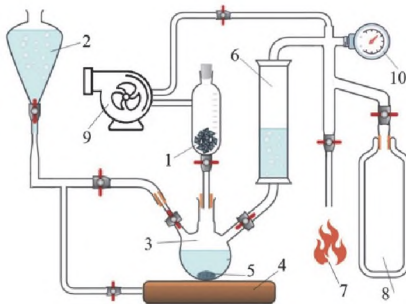
որտեղ $C_{\text{ցանց}, y}$ -ը էլեկտրական ցանցի ընդլայնման կապիտալ ծախսերն են տվյալ «y» տարում, $O_{\text{ցանց}, y}$ -ը՝ ընդլայնված էլեկտրական ցանցի շահագործման ծախսերը տվյալ «y» տարում, EC_y -ը՝ տվյալ «y» տարվա ընթացքում էլեկտրական ցանցից սպառված էլեկտրաէներգիայի արժեքը:

Ինքնավար ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի ԷՀԱ-ն կազմել է 1.48 ԱՄՆ դոլար/կՎտ·ժ: Հաշվարկների արդյունքներով՝ սահմանային կետը դիտարկվող դեպքում կազմել է 3 կմ, որի պայմաններում էլեկտրական ցանցի ընդլայնման ԷՀԱ-ն կազմել է

1.51 ԱՄՆ դոլար/կՎտ·ժ: Այսպիսով, եթե ուսումնասիրվող օբյեկտը գտնվում է 3 կմ կամ ավելի հեռավորության վրա, էլեկտրական ցանցի ընդլայնումը դառնում է տնտեսապես ոչ նպատակահարմար, իսկ ինքնավար ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի ներդրումը՝ տնտեսապես առավել արդյունավետ տարբերակ:

Գլխի եզրափակիչ մասում նկարագրված են մշակված այլումինե խթանիչով աշխատող դյուրակիր ջրածնային գեներատորի աշխատանքային սկզբունքը, կառուցվածքը, ինչպես նաև պատրաստված նախանմուշի լաբորատոր պայմաններում փորձարկման արդյունքները:

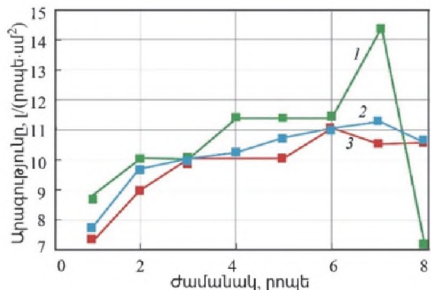
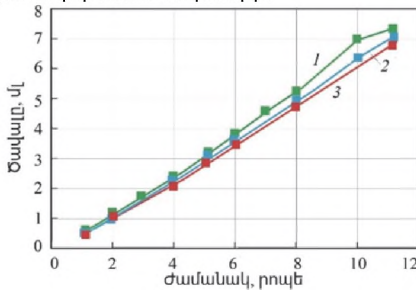
Գեներատորի կառուցվածքի սխեմատիկական պատկերը և ընդհանուր տեսքը բերված են նկ. 7-ում: Ներկայացված սխեմայում (1) այլումինե ջարդոնը՝ մանր տաշեղների և կտորների տեսքով, և (2) ջուրը՝ որոշակի ծավալով և արագությամբ, ներբեռնվում են (3) ռեակցիոն խցիկ, որտեղ էկզոթերմային քիմիական ռեակցիաների արդյունքում տեղի է ունենում ջրածնի գեներացում: Խթանիչի մակերևույթին կայուն բնական օքսիդի թաղանթի արդյունավետ քայքայման համար որպես հավելում օգտագործվել է նատրիումի հիդրօքսիդ (NaOH): Ռեակցիոն խցիկի հովացումն իրականացվում է շրջանառվող ռեժիմում (4) ջրի հոսքով: Ռեակցիաների (5) արգասիքները կուտակվում են խցիկի ստորին հատվածում՝ հետագայում այնտեղից հեռացման և վերամշակման տեխնիկական հնարավորությամբ: Անջատված ջրածինը մաքրվում է՝ անցնելով (6) ջրային ֆիլտրով, իսկ այնուհետև կամ տրվում է անմիջականորեն (7) սպառիչ սարքին, կամ էլ կուտակվում է (8) գլանանոթում: Ջրածնի հոսքը փչահարվում է (9) պոմպով և հսկվում է (10) մանոմետրով:



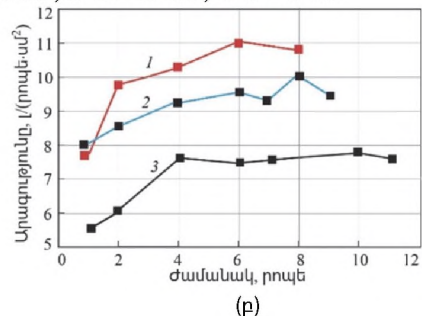
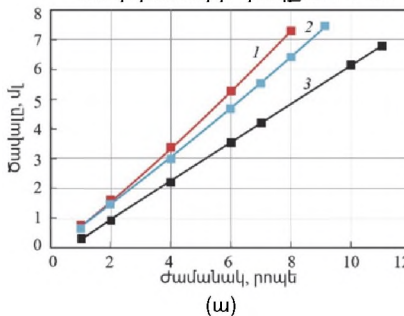
Նկ. 7. Դյուրակիր ջրածնային գեներատորի կառուցվածքի սխեմատիկական պատկերը (ձախից) և ընդհանուր տեսքը (աջից)

Փորձարարական հետազոտություններով որոշվել են գեներացվող ջրածնի ծավալի և արագության ֆունկցիոնալ կախվածություններն այլումինե թիթեղիկի մակերեսից և հիմնային լուծույթի խտությունից (նկ. 8, նկ. 9): Արդյունքներով հաստատվել է, որ առավելագույն արդյունավետությունը ստացվում է NaOH -ի 5 Մ խտության դեպքում: Սահմանվել են գեներատորի կառուցվածքային և աշխատանքային օպտիմալ պարամետրերը: Մշակված դյուրակիր ջրածնային գեներատորը կարող է համակցվել ջրածնային ՎՏ-ի հետ և ինտեգրվել ՖՎԿ-ներին՝ փոխարինելով ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ում կիրառվող թանկարժեք սարքավորումները, ինչպիսիք են էլեկտրոլիզը և բարձր ճնշման ԶԿ-ը: Նման մոտեցումը

հնարավորություն կտա զգալիորեն նվազեցնել ԶԿՀԱՖԷԿ-ի ներդրումային և շահագործման ծախսերը:



Նկ. 8. Գեներացված ջրածնի ծավալի (ա) և գեներացման արագության (բ) ժամանակային կախվածությունները թիթեղիկի մակերևույթի տարբեր մակերեսների դեպքում. 1-S = 15 սմ², 2-S = 10 սմ², 3-S = 5 սմ²



Նկ. 9. Գեներացված ջրածնի ծավալի (ա) և գեներացման արագության (բ) ժամանակային կախվածությունները հիմնային լուծույթի տարբեր խտությունների դեպքում. 1-C = 5 U, 2-C = 10 U, 3-C = 3 U

ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Առենախոսության շրջանակում իրականացվել է համակողմանի գիտական ուսումնասիրություն, որի նպատակն է ապահովել միասնական էլեկտրական ցանցից մեկուսացված օբյեկտների ինքնավար էներգամատակարարումը՝ ՖՎ և ջրածնային տեխնոլոգիաների համակցված կիրառման միջոցով: Մշակվել է ինքնավար էներգամատակարարման ամբողջական համակարգ, որի կառուցվածքը, աշխատանքի սկզբունքները և կառավարման մեխանիզմները հիմնավորված են մոդելավորման, փորձարարական և տեխնիկատնտեսական վերլուծությամբ: Ստացված արդյունքները հնարավորություն են տալիս՝ ապահովելու էներգիայի շարունակական, հավասարակշռված և արդյունավետ մատակարարումը միասնական էլեկտրական ցանցերից մեկուսացված օբյեկտներին:

1. Հաստատվել է, որ ՖՎ և ջրածնային տեխնոլոգիաների համակցումը հանդիսանում է կայուն էներգետիկ զարգացման և հանածո վառելիքներից կախվածության նվազեցման արդյունավետ ուղի: Գեներացված արևային էներգիայի ավելցուկի երկարաժամկետ կուտակումը ջրածնի տեսքով և դրա հետագա

օգտագործումը ՎՏ-ի միջոցով ապահովում են համակարգի անխափան աշխատանքը տարվա ցանկացած ժամանակաշրջանում՝ փոխհատուցելով արևային գեներացիայի անկայունությունը և բեռների օրական տատանումները:

2. Հիմնավորվել է լիթիում-իոնային մարտկոցների և ՊՓԹՎՏ-ի միասնական կիրառման նպատակահարմարությունը՝ տարբեր էներգետիկ ռեժիմներում էներգիայի կուտակման հուսալիության և կիրառման արդյունավետության տեսանկյունից: Նման հիբրիդային մոտեցումը բարձրացնում է համակարգի ընդհանուր էներգաարտադրողականությունը, նվազեցնում է էներգետիկ կորուստները և մեծացնում շահագործման կայունությունը:

3. Մշակվել են ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի ընդհանրացված կառուցվածքը և նախագծման մեթոդաբանությունը, որոնք ապահովում են կարճաժամկետ և երկարաժամկետ էներգետիկ հավասարակշռություն: Սահմանվել են համակարգի բաղադրիչների փոխազդեցության սկզբունքները, հզորությունների օպտիմալ ընտրության չափանիշները, ինչպես նաև էներգիայի արտադրության, կուտակման և սպառման գործընթացների կառավարման և համակարգման մեխանիզմները:

4. Առաջարկվել է ԾՏՎ-ի հիման վրա գործող կառավարման և մոնիթորինգի ալգորիթմ, որը իրական ժամանակում վերահսկում և օպտիմալացում է ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի էներգահոսքերը: Ալգորիթմը ապահովում է ՖՎ կայանի, էլեկտրոլիզի, ԶԿ-ի, ՎՏ-ի և մարտկոցների աշխատանքի համակարգված կառավարում, էներգիայի հաշվառում, տվյալների կոդավորում և տեղեկատվական փոխանակում: Էներգետիկ իրավիճակային վերլուծության հիման վրա սահմանվել են բաղադրիչների գործարկման և անջատման առաջնահերթությունները, ինչը բարձրացնում է համակարգի աշխատանքային արդյունավետությունը և շահագործման հուսալիությունը:

5. Առաջարկվել է Արևի շարժմանը երկառնանցային հետևման հիբրիդային սկզբունք, որն ապահովում է Արևին հետևող լուսաընդունիչ մակերևույթի օպտիմալ կողմնորոշում՝ օրվա ցանկացած պահին և եղանակային ցանկացած պայմաններում: Այս լուծումը հնարավորություն է տալիս առավելագույնի հասցնել էներգաարտադրությունը սահմանափակ մակերես ունեցող տեղամասերում, ինչը հատկապես նպատակահարմար է Հայաստանի բարձր ճառագայթային ռեսուրսներով լեռնային շրջաններում իրականացնելու համար:

6. Հիմք ընդունելով «բեռնվածքը կորցնելու հավանականության» բացառման պահանջը՝ մշակվել է ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տարեկան էներգամատակարարման ծավալի գնահատման մոդել՝ ըստ համալրող բաղադրիչների անվանական (դրվածքային) հզորության արժեքների: Մոդելում հաշվի են առնվել դրանց արդյունավետության ցուցանիշները, էներգետիկ կորուստները, գեներացված էներգիայի ավելցուկը և պակասորդը, ինչպես նաև տարվա ընթացքում շահագործման տևողությունը: Առանձնացված օբյեկտի մոդելավորման արդյունքներով հաստատվել են համակարգի տեխնիկական կենսունակությունը և դրա կարողությունը՝ ապահովելու էներգիայի լիարժեք հավասարակշռված մատակարարում տարվա կտրվածքով:

7. Որպես ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տնտեսական գնահատման հիմնական ցուցանիշ դիտարկվել է ԷՀԱ-ն, որն օգտագործվել է համակարգի և միասնական էլեկտրական ցանցի ընդլայնման հնարավորությունների համեմատության դեպքում: Մոդելային օբյեկտի տարեկան շահագործման արդյունքներով հաստատվել է, որ ինքնավար ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի տեղակայումը տնտեսապես նպատակահարմար է այն դեպքում, երբ օբյեկտը գտնվում է միասնական

էլեկտրական ցանցից առնվազն 3 կմ հեռավորության վրա: Այս դեպքում համակարգի էՀԱ-ն (1. 48 ԱՄՆ դոլար/կՎտ.ժ) համադրելի է ցանցի ընդլայնման հաշվարկային արժեքի (1. 51 ԱՄՆ դոլար/կՎտ.ժ) հետ:

8. Մշակվել և լաբորատոր պայմաններում փորձարկվել է այլումինե խթանիչով աշխատող դյուրակիր ջրածնային գեներատորի նախատիպ, որը հիմնված է ջրի մոլեկուլների էկզոթերմային տրոհման գործընթացի վրա հիմնային լուծույթում: Փորձարարական արդյունքներով սահմանվել են գեներատորի կառուցվածքային և աշխատանքային օպտիմալ պարամետրերը: Նման գեներատորի ինտեգրումը ԶԿՀՀԱՖՎԷԿ-ի կազմում ընդլայնում է վերջինիս կիրառական հնարավորությունները՝ բարձրացնելով ներդրումային գրավչությունը:

Ընդհանուր առմամբ, ատենախոսության արդյունքներով ձևավորվել են ՖՎ և ջրածնային տեխնոլոգիաների համակցման նոր գիտամեթոդական հիմքեր՝ ապահովելով ինքնավար էներգամատակարարման համակարգերի նախագծման, մոդելավորման և արդյունավետ կառավարման տեսական ու կիրառական գործիքակազմ: Աշխատանքն իր տեսական և կիրառական նշանակություններով կարող է նպաստել Հայաստանի և նմանատիպ երկրների էներգետիկ անվտանգության, կայուն զարգացման և կանաչ տեխնոլոգիաների ներդրման ռազմավարական ուղղությունների ամրապնդմանը:

Ատենախոսության հիմնական դրույթները հրատարակված են հետևյալ աշխատանքներում.

1. **Авоян Р.О., Тамразян М.Г.** Развитие возобновляемой энергетики Республики Армения // Проблемы социально-экономического развития: поиски, перспективы, решения. – 2021. – №1(5). – С. 312–319.
2. **Avoyan R.H.** Alternative energy: types of wind power plants and their impact on the environment // Bulletin of High Technology. – 2021. – №2(16). – P. 25–29.
3. **Avoyan R.H.** Alternative energy: the comparative analysis of solar flat and concentrator photovoltaics // Bulletin of High Technology. – 2021. – №1(15). – P. 34–38.
4. **Avoyan Romik.** Water electrolysis for green hydrogen: analysis of technologies // National Academy of Sciences of RA: Electronic Journal of Natural sciences. – 2025. – Vol. 44(1). – P. 4–15.
5. **Avoyan R.H.** Development of an off-grid solar power plant integrated with a hydrogen storage system // Proc. of the RA NAS and NPUA. Ser. of Tech. sc.– 2024. – Vol. LXXVII, №3. – P.308–314.
6. **Դոնոյան Ա.Ա., Վարդանյան Գ.Պ., Ավոյան Ռ.Հ.** Արևի շարժմանը երկու առանցքով հետևող հիբրիդային համակարգի մշակումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. – 2022. – Հ. LXXV, №1. – Էջ. 65–71:
7. **Avoyan R.H.** Techno-economic analysis of an off-grid solar power plant integrated with a hydrogen storage system: a case study of Hankavan, Armenia // Proceedings of NPUA: Electrical engineering, energetics. – 2024. – №2. – P. 102–125.
8. **Վարդանյան Ա.Ա., Ավոյան Ռ.Հ., Վարդանյան Գ.Պ.** Դյուրակիր ջրածնային գեներատորի մշակումը և փորձարկումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. – 2024. – Հ. LXXVII, №3. – Էջ. 301–307:

АВОЯН РОМИК ОГАННЕСОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ С КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ВОДОРОДНОГО НАКОПИТЕЛЯ

РЕЗЮМЕ

Современные энергетические системы стоят перед двумя глобальными вызовами: отсутствием доступа к электрическим сетям в ряде регионов и растущим экологическим ущербом от использования ископаемого топлива. Ключевым решением этих проблем является применение возобновляемых источников энергии, в частности, комбинация солнечных фотовольтаических (ФВ) и водородных технологий. Их интеграция позволяет создавать автономные энергосистемы нового поколения, способные полностью обеспечивать удалённые объекты, изолированные от централизованных сетей.

Целью работы является разработка и исследование автономной солнечной фотовольтаической электростанции, комбинированной с водородной накопительной системой (СФВЭК-ВНС), которая обеспечит непрерывное, сбалансированное и эффективное энергоснабжение объектов, изолированных от электрических сетей.

Научная новизна.

- Разработаны структурная и функциональная модель автономной СФВЭК-ВНС, алгоритм управления и мониторинга системы, обеспечивающие непрерывное и сбалансированное энергоснабжение в различных временных режимах.

- Разработана гибридная система двухосевого слежения за движением Солнца с использованием микроконтроллера Arduino UNO и гибридного алгоритма, которая позволяет в любой момент времени определить угол наклона системы, обеспечивающий максимальную мощность, независимо от погодных условий.

- На примере Армении выполнено технико-экономическое исследование автономной СФВЭК-ВНС, которая позволяет для рассматриваемого объекта оценить годовой объём энергоснабжения автономной системы путем обеспечения энергетического баланса и исключения “вероятности потери нагрузки”, а также оценить экономическую эффективность по сравнению с расширением единой электрической сети на основе средней нормированной стоимости электроэнергии (СНСЭЭ) автономной системы и расширения единой электрической сети в граничной точке.

- Разработан и испытан лабораторный прототип портативного водородного генератора с алюминиевым активатором, основанный на процессе экзотермического разложения молекул воды в щелочном растворе. Экспериментальными исследованиями определены наиболее эффективные режимы генерации водорода.

Основные выводы.

В рамках диссертационной работы проведено комплексное научное исследование, направленное на обеспечение автономного энергоснабжения объектов, изолированных от единой электрической сети, на основе совместного применения ФВ и водородных технологий. Разработана целостная система автономного энергоснабжения, структура, принципы функционирования и механизмы управления которой обоснованы результатами моделирования, экспериментальных исследований и технико-экономического анализа. Полученные результаты позволяют обеспечить непрерывное, сбалансированное и эффективное энергоснабжение объектов, изолированных от единой электрической сети.

- Установлена эффективность комбинирования ФВ и водородных технологий для устойчивого энергоразвития. Долгосрочное аккумулирование избыточной солнечной энергии в виде водорода и его последующая конверсия в топливных элементах обеспечивают бесперебойную работу системы в любое время года, компенсируя нестабильность генерации и суточные колебания нагрузки.

- Обоснована целесообразность совместного применения литий-ионных аккумуляторов и топливного элемента с протон-обменной мембраной с точки зрения надёжности накопления энергии и эффективности её использования в различных

энергетических режимах. Такой гибридный подход повышает общую энергетическую производительность системы, снижает энергетические потери и повышает эксплуатационную устойчивость.

- Разработаны обобщённая структура и методология проектирования СФВЭК-ВНС, обеспечивающие краткосрочный и долгосрочный энергетический баланс. Установлены принципы взаимодействия компонентов системы, критерии оптимального выбора мощностей, а также механизмы управления и координации процессов производства, накопления и потребления энергии.

- Предложен алгоритм управления и мониторинга на основе программируемого логического контроллера, который в реальном времени контролирует и оптимизирует энергопоток СФВЭК-ВНС. Алгоритм обеспечивает скоординированное управление работой ФВ станции, электролиза, водородного накопителя, топливного элемента и аккумуляторов, учёт энергии, кодирование данных и обмен информацией. На основе анализа энергетической ситуации определены приоритеты запуска и отключения компонентов, что повышает эффективность работы системы и надёжность её эксплуатации.

- Предложен гибридный принцип двухосного слежения за Солнцем, который обеспечивает оптимальное ориентирование светоприёмной поверхности на Солнце в любое время суток и при любых погодных условиях. Это решение позволяет максимально повысить выработку энергии на участках с ограниченной площадью, что особенно целесообразно для реализации в горных районах Армении с высоким солнечным излучением.

- На основе требования исключения «вероятности потери нагрузки» разработана модель оценки годового объёма энергоснабжения СФВЭК-ВНС по номинальным значениям мощности компонентов. В модели учтены показатели их эффективности, энергетические потери, избыток и дефицит генерируемой энергии, а также продолжительность эксплуатации в течение года. Результаты моделирования выделенного объекта подтвердили техническую жизнеспособность системы и её способность обеспечивать полное сбалансированное энергоснабжение в годовом разрезе.

- В качестве основного показателя экономической оценки СФВЭК-ВНС рассмотрена СНСЭЭ, использованная при сравнении возможностей системы и расширения единой электрической сети. Результаты годовой эксплуатации модельного объекта подтвердили, что размещение автономной СФВЭК-ВНС экономически целесообразно в случае, когда объект находится на расстоянии не менее 3 км от единой электрической сети. В этом случае СНСЭЭ системы (1,48 долл. США/кВт·ч) сопоставима с расчётной стоимостью расширения сети (1,51 долл. США/кВт·ч).

- Спроектирован и испытан лабораторный прототип портативного водородного генератора на основе экзотермического расщепления воды в щелочной среде с алюминиевым катализатором. На основе результатов эксперимента определены оптимальные конструктивные и эксплуатационные параметры генератора. Интеграция такого генератора расширяет функциональные возможности СФВЭК-ВНС, повышая инвестиционную привлекательность.

По результатам диссертационного исследования сформированы новые научно-методические основы интеграции ФВ и водородных технологий, обеспечивающие теоретический и прикладной инструментарий для проектирования, моделирования и эффективного управления автономными системами энергоснабжения. Работа с теоретической и практической значимостью может способствовать укреплению стратегических направлений энергетической безопасности, устойчивого развития и внедрения «зелёных» технологий в Армении и аналогичных странах.

**DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A SOLAR POWER PLANT INTEGRATED
WITH A HYDROGEN STORAGE SYSTEM**

SUMMARY

Contemporary energy systems face two major global challenges: limited access to electricity grids in certain regions and the increasing environmental impact of fossil fuel use. A key solution to these challenges is the deployment of renewable energy sources, particularly through the combination of solar photovoltaic (PV) and hydrogen technologies. The integration of these technologies enables the development of next-generation autonomous energy systems capable of fully supplying remote facilities isolated from centralized grids.

The purpose of the work is the development and investigation of an autonomous solar photovoltaic power plant combined with a hydrogen storage system (SPVPP-HSS) that will ensure continuous, balanced, and efficient energy supply to objects isolated from electrical networks.

The scientific novelty.

- A Structural and functional model of the autonomous SPVPP-HSS has been developed, along with a system control and monitoring algorithm that ensures continuous and balanced energy supply under various operating time regimes.

- A hybrid dual-axis solar tracking system has been developed using an Arduino UNO microcontroller and a hybrid algorithm, which makes it possible to determine, at any time of the day, the tilt angle of the system that ensures maximum power output, regardless of weather conditions.

- A techno-economic study of an autonomous SPVPP-HSS has been carried out using Armenia as a case study, enabling the evaluation of the amount of annual energy supply of the autonomous system for the considered object while ensuring the energy balance and excluding the “loss of load probability,” as well as assessing the economic efficiency in comparison with the expansion of the centralized electrical grid based on the leveled cost of electricity (LCOE) of the autonomous system and the grid expansion at the boundary point.

- A laboratory prototype of a portable hydrogen generator operating with an aluminum activator has been developed and tested based on the exothermic decomposition of water molecules in an alkaline solution. Experimental studies have identified the most efficient hydrogen generation regimes.

The main conclusions.

Within the framework of this dissertation, a comprehensive scientific study was conducted to ensure autonomous energy supply for facilities isolated from the centralized electrical grid through the combined application of PV and hydrogen technologies. A complete autonomous energy supply system was developed, with its structure, operating principles, and control mechanisms validated through modeling, experimental studies, and techno-economic analysis. The results demonstrate the system’s capability to provide continuous, balanced, and efficient energy supply to facilities isolated from the centralized electrical grid.

- The effectiveness of combining PV and hydrogen technologies for sustainable energy development has been established. Long-term accumulation of excess solar energy in the form of hydrogen and its subsequent conversion in fuel cells ensures uninterrupted system operation throughout the year, compensating for generation variability and daily load fluctuations.

- The feasibility of the combined use of lithium-ion batteries and a proton-exchange membrane fuel cell has been substantiated from the standpoint of energy storage reliability and utilization efficiency in various operating modes. This hybrid approach enhances the overall energy performance of the system, reduces energy losses, and improves operational stability.

- A generalized structure and design methodology for the SPVPP-HSS have been developed, ensuring short-term and long-term energy balance. The principles of component interaction, criteria for optimal capacity selection, as well as mechanisms for managing and coordinating energy production, storage, and consumption processes have been established.

- A control and monitoring algorithm based on a programmable logic controller (PLC) has been developed to monitor and optimize the energy flows of the SPVPP-HSS in real time. The algorithm enables coordinated management of the PV plant, electrolysis unit, hydrogen storage, fuel cell, and batteries, as well as energy accounting, data encoding, and information exchange. Based on the analysis of the energy situation, priorities for component startup and shutdown have been established, enhancing the system's efficiency and operational reliability.

- A hybrid two-axis solar tracking principle has been proposed, which ensures optimal orientation of the light-receiving surface toward the Sun at any time of day and under any weather conditions. This solution allows for maximizing energy output on sites with limited area, which is particularly suitable for implementation in the mountainous regions of Armenia with high solar radiation.

- A model for estimating the annual energy supply volume of the SPVPP-HSS has been developed, based on the requirement to eliminate the "loss of load probability" and using the nominal capacity values of the components. The model accounts for their efficiency indicators, energy losses, surplus and deficit of generated energy, as well as annual operating duration. Modeling results for the selected object confirmed the technical viability of the system and its ability to provide complete, balanced energy supply on an annual basis.

- LCOE is used as the main indicator for the economic assessment of the SPVPP-HSS applied in comparing the system's potential with grid extension. The results from annual operation of a model object confirmed that deploying an autonomous SPVPP-HSS is economically feasible when the object is located at least 3 km from the centralized electrical grid. In this case, the system's LCOE (1.48 USD/kWh) is comparable to the estimated cost of grid extension (1.51 USD/kWh).

- A laboratory prototype of a portable hydrogen generator based on the exothermic splitting of water in an alkaline environment with an aluminum catalyst has been designed and tested. Based on the experimental results, the optimal structural and operational parameters of the generator have been determined. The integration of such a generator expands the functionality of the SPVPP-HSS by enhancing its investment attractiveness.

Overall, the results of the dissertation have established new scientific and methodological foundations for the integration of PV and hydrogen technologies, providing a theoretical and practical toolkit for the design, modeling, and efficient management of autonomous energy supply systems. Owing to its theoretical and applied significance, the work can contribute to strengthening the strategic directions of energy security, sustainable development, and the implementation of green technologies in Armenia and similar countries.

