

Энергия тасымалдау жүйесінде талшықты-оптикалық желілерін қолдануды зерттеу

¹**НЕШИНА Елена Геннадьевна**, т.ф.к., кафедра меңгерушісі, e.neshina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>,

¹**ЮГАЙ Вячеслав Викторович**, PhD, кафедра меңгерушісі, slawa_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7249-2345>,

¹**КАЛЫТКА Валерий Александрович**, PhD, профессор, v.kalytka@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3232-1285>,

^{1,2}***МУКАШЕВА Динара Талгатовна**, докторант, ғылыми-зерттеу және оқыту бөлімінің бас маманы, dinara_north@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9064-2711>,

³**УСАБАЕВ Данияр Маратович**, директор, 22082@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5578-8866>,

¹Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан,

²«220 VOLT» ЖШС, Қарағанды, Қазақстан,

³Қазақстан стандарттау және метрология институты, Астана, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Қашықтықтағы датчиктерге және аз қуатты электроникаға электр энергиясын талшықты-оптикалық өткізгіш арқылы беру жүйесі зерттелген. Жүйенің құрылымы, зерттеу әдістемесі сипатталған. Зерттеуде 650 нм толқын ұзындығындағы жартылай өткізгіш лазерлер мен жарық энергиясын электрлік энергияға түрлендіретін фототүрлендіргіштер қолданылып, олардың тиімділігі анықталды. Шығыс электрлік параметрлері өлшенді. Энергия берудің тиімділігі анықталды. Зерттеу нәтижелері бойынша мониторинг және телеметрия жүйелерінде қолданылатын энергия мен деректерді біріктіруге арналған оптикалық талшық технологиясы негізіндегі жүйенің тұжырымдамасы әзірленді. Осы жүйе бір уақытта энергия мен ақпаратты таратуға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: оптикалық талшық, энергияны беру, фототүрлендіргіш, лазерлік сәулелену, гальваникалық ажырату.

Кіріспе

Заманауи өнеркәсіптік жүйелерде, атап айтқанда энергетикада, тау-кен өндірісінде және автоматтандырылған қондырғыларда электр желілеріне қойылатын талаптар жыл сайын күшейіп келеді. Сенімділік, электр қауіпсіздігі және электромагниттік кедергілерге төзімділік мұндай жүйелер үшін негізгі талаптардың бірі болып табылады. Металл өткізгіштерді қолдану аталған талаптарды толық қамтамасыз ете бермейді және кейбір жағдайларда қауіпті болуы мүмкін. Осыған байланысты талшықты-оптикалық арна арқылы қашықтағы электрондық құрылғыларды қуаттандыру мәселесін зерттеуге қызығушылық артып отыр.

Талшықты-оптикалық өткізгіштердің негізгі артықшылықтарының бірі – энергия көзі мен жүктеме арасындағы толық гальваникалық оқшаулауды қамтамасыз ету. Сонымен қатар, мұндай жүйелер электромагниттік кедергілердің әсерін төмендетеді және өрт

қауіпсіздігі деңгейін арттырады. Бұл бағыт шетелдік зерттеулерде белсенді дамып келе жатқанымен, Қазақстанда талшықты-оптикалық арна арқылы энергия беру мәселесі жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сондықтан ұсынылған жұмыс өзекті болып табылады.

Мақаланың мақсаты – оптикалық талшықтар арқылы энергияны беру жүйесін эксперименттік түрде зерттеу және оны аз қуатты тұтынушылар үшін қуат көзі ретінде пайдалану мүмкіндігін негіздеу.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы тәжірибелік және теориялық деңгейде негізделді. Көрінетін сәулелену диапазонында (650 нм) кремний фототүрлендіргіштерімен жұмыс істей отырып, талшықты-оптикалық кабель арқылы электр энергиясын беру принципі нақты эксперимент арқылы көрсетілді. Алғаш рет зерттелген жүйе конфигурациясы үшін арнаның барлық шығындарын, атап айтқанда сәулені енгізу, таралу және фотоэлектрлік түрлендіру шығындарын ескеретін

тиімді сөну коэффициенті есептелді. Тәжірибе барысында сигнал қуаты мен қашықтық арасындағы экспоненциалды байланыс, сондай-ақ талшық ұзындығының шығыс қуатына әсері анықталды. Таралу ортасындағы әлсіреу коэффициенті алынып, жүйенің энергетикалық сипаттамаларына әртүрлі жағдайлардың ықпалы сандық түрде бағаланды. Нәтижесінде мониторинг пен телеметрия жүйелері үшін энергия мен деректерді бір уақытта беруге арналған гибриді жүйе тұжырымдамасының негіздері әзірленді.

Зерттеу әдістері

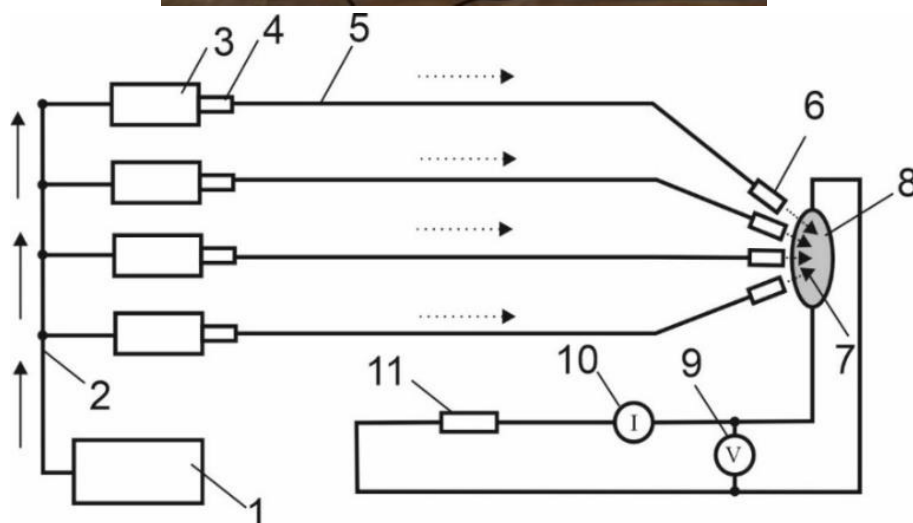
Талшықты-оптикалық қуат беру жүйесін тексеру үшін арнайы зертханалық стенд құрылды. Жарық көзі ретінде үздіксіз режимде жұмыс істейтін төрт жартылай өткізгіш лазер пайдаланылды. Әр лазердің қуаты шамамен 20 мВт, ал толқын ұзындығы 650 нм құрады. Лазерлердің қуат мәндері бір-біріне жақын болғандықтан, жарық ағыны фототүрлендір-

гіш бетіне салыстырмалы түрде біркелкі бағытталды.

Лазерлер тұрақтандырылған тұрақты ток көзінен қуат алды. Қоректендіру кернеуі 2,94 В, ал бір лазердің ток тұтынуы 0,28 А болды, нәтижесінде жүйенің жалпы тогы 1,12 А болды. Лазерлер талшықты-оптикалық кабельге талшықтың кіріс және шығыс ұштарына орнатылған стандартты SC типті оптикалық қосқыштар арқылы қосылды.

Энергия беру арнасы ретінде өзек диаметрі 50 мкм және қабықша диаметрі 125 мкм болатын G.651 талшықты-оптикалық кабелі пайдаланылды. Бұл талшық түрі қолжетімділігімен, кең таралуымен және зерттелген диапазонда жарықты жеткілікті деңгейде өткізу қабілетімен ерекшеленеді. Энергия талшыққа лазер сәулесі арқылы енгізіліп, кейін қабылдау жағына жеткізілді.

Талшықты-оптикалық өткізгіштің шығысында оптикалық сәулелену жарық энер-



1-сурет – Талшықты-оптикалық арна арқылы энергия беру зертханалық қондырғысы және оның құрылымдық сұлбасы

гиясын электр энергиясына түрлендіруге арналған фототүрлендіргіштің бетіне шоғырланды. Әрбір лазер көзіне сәйкес келетін төрт жарық фотоқабылдағыштың бетіне түсті. Фотоэлектрлік режимде жұмыс істейтін кремний фотосезімтал пластина фототүрлендіргіш ретінде қызмет етті.

Шығыс кернеуі мен жүктеме тогын өлшеу үшін екі сандық мультиметр пайдаланылды. Электр жүктемесі фотодетектордың шығыс терминалдарына тікелей қосылды. Бұл жүйенің жұмыс режимін нақты өлшеуге мүмкіндік берді. Шығыс қуаты мен энергия беру тиімділігін бағалау үшін тәжірибелер әртүрлі жүктеме мәндерімен жүргізілді.

Фототүрлендіргіш элементінің температурасы Fluke 62 MAX инфрақызыл пирометрімен (дәлдігі $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$) бақыланды.

Фототүрлендіргіштен алынған қуат лазерлердің жалпы кіріс қуатымен салыстырылды. Өлшеу нәтижелері өңделіп, өзара салыстырылды. Алынған деректер жүйенің энергетикалық сипаттамалары тәжірибе жағдайларына тәуелді екенін көрсетті.

Осы әдіс арқылы энергияның талшық бойымен таралу ерекшеліктерін бағалауға

мүмкіндік туды. Алынған деректер жүйені жетілдіру бағыттарын анықтау үшін пайдаланылды.

Ғылыми нәтижелер

Шығыс электрлік қуатқа талшық ұзындығының ықпалы зерттелді, бұл арна бойынша энергия берудің тиімділігін сипаттайды. Талшық ұзындығы артқан сайын оптикалық сәулелену қуаты біртіндеп төмендейтіні анықталды. Тәжірибе тұрақты шарттарда жүргізілді: 4 лазер, толқын ұзындығы 650 нм, G.651 көпмодалы талшығы, 1 кОм жүктеме және $20-25^{\circ}\text{C}$ температура.

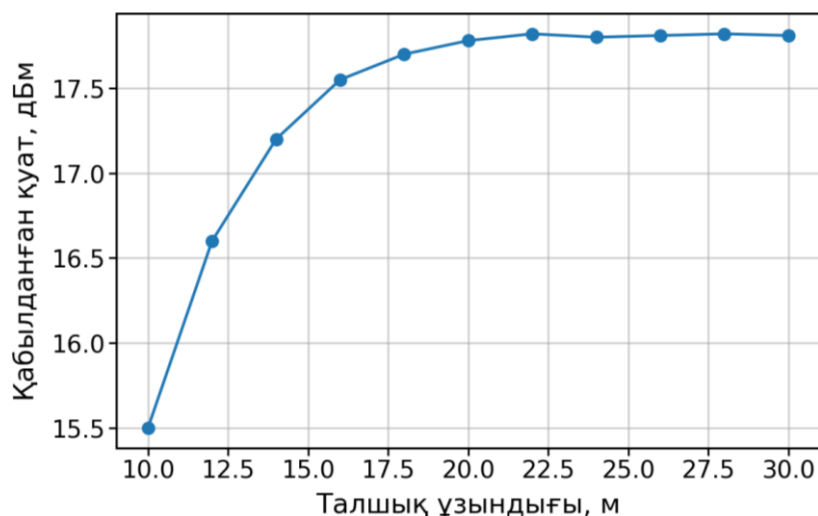
Талшық ұзындығының артуына байланысты шығыс қуатының өзгерісі өлшеніп, энергияны жеткізудің тиімді қашықтығы бағаланды. Өлшеу үш рет қайталанды; нәтижелер арасындағы айырмашылық 5%-дан аспады, бұл деректердің қайталанымдылығын көрсетеді.

2-5-суреттерде сигналдың әлсіреу сипаты көрсетілген. Алынған нәтижелер теориялық модельдермен сәйкес келеді.

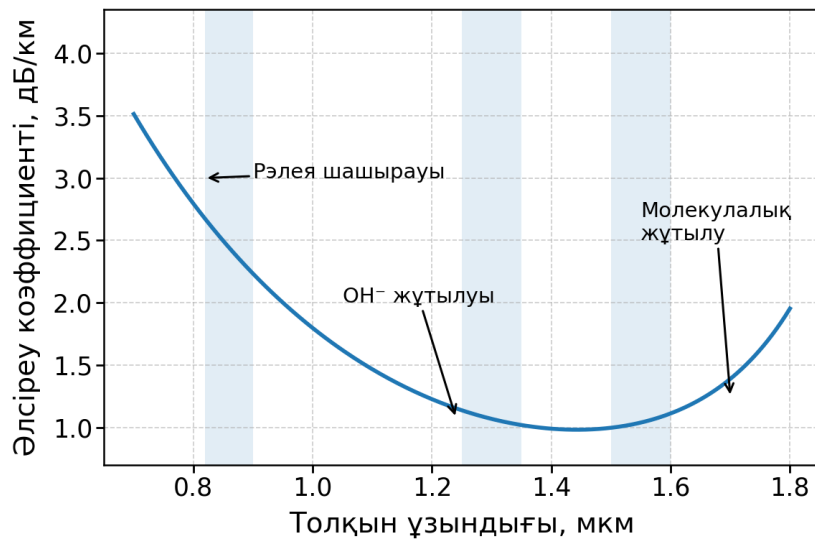
Зерттеу нәтижесінде алынған әлсіреу мәндері стандартты телекоммуникациялық талшықтармен салыстырғанда жоғары бол-

Талшық ұзындығының шығыс қуатына әсері

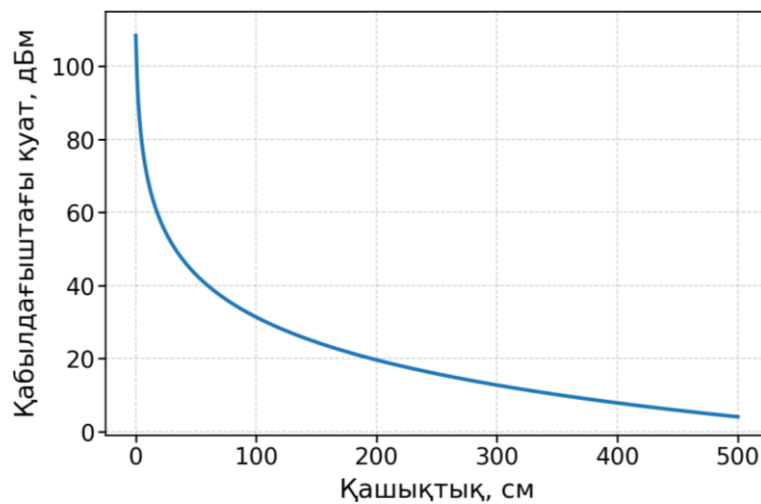
Талшық ұзындығы L, м	Кернеуі U, V	Ток I, mA	Қуат шығысы, Вт	Салыстырмалы қуат, %
5	2,20	4,99	0,0110	100
10	2,12	4,72	0,0100	91
25	1,96	4,18	0,0082	75
50	1,74	3,55	0,0062	56



2-сурет – Қабылданған оптикалық қуаттың (дБм) талшықты-оптикалық арнаның ұзындығына (м) тәуелділігі



3-сурет – Кварц оптикалық талшығындағы мөлдірлік терезелерін бөлу кезіндегі әлсіреу коэффициентінің спектрлік тәуелділігі



4-сурет – Қабылдағыштағы қуаттың қашықтыққа тәуелділігі, тарату арнасындағы сигналдың әлсіреуін сипаттайды

ды. Бұл құбылыс 650 нм диапазонында оптикалық шығындардың жоғары болуымен түсіндіріледі, өйткені телекоммуникациялық талшықтар үшін оңтайлы диапазондар 1310 нм және 1550 нм болып табылады.

Талшық ұзындығы артқан сайын шығыс қуаты төмендейді. Бұл заңдылықты сипаттау үшін талшықтағы жарықтың сіңуі мен шашырауынан туындайтын шығындарды ескеріп экспоненциалды модель қолданылды (формула 1).

$$P(L) = P_0 \cdot e^{(-\alpha L)}, \quad (1)$$

мұндағы $P(L)$ – талшықтың белгілі бір ұзындығындағы шығыс қуаты;

α – сигналдың әлсіреу коэффициенті;

L – талшықтың ұзындығы.

Бұл модель талшық ішінде пайда болатын сигнал шығындарының сипатын анықтауға мүмкіндік береді. Тәжірибелік деректер есептеу нәтижелерімен сәйкес келді. Сондықтан бұл модель энергияның талшық бойымен таралуын талдау үшін қолданылды.

4-суреттен көрініп тұрғандай, қашықтық артқан сайын қабылдағыштағы қуат біртіндеп төмендейді. Бастапқы учаскеде шығынның жоғары болуы сәулені талшыққа енгізу кезінде энергияның бір бөлігінің жоғалуымен байланысты. Кейінгі бөлікте жарық талшық ішінде салыстырмалы түрде тұрақты

таралады.

Қуаттың қашықтыққа тәуелділігін логарифмдік координаттарда талдау үшін электромагниттік және оптикалық сигналдарды тарату есептерінде кең қолданылатын логарифмдік әлсіреу моделі қолданылды (формула 2).

$$P(d) = P_0 \cdot d^{-n}, \quad (2)$$

мұндағы $P(d)$ – жарық өткен қашықтықтағы қуат;

P_0 – бастапқы қуат;

n – қуаттың әлсіреу дәрежесі;

d – жарықтың жүріп өткен жолының ұзындығы.

Тәжірибе нәтижелері қуат пен қашықтық арасында айқын тәуелділік бар екенін көрсетті. Қашықтық артқан сайын сигнал деңгейі төмендейді, ал n параметрі осы әлсіреу дәрежесін сипаттайды.

Есептеу барысында $n = 1,32-2,34$ аралығындағы мәндер алынды. Бұл көрсеткіштер тәжірибелік сигналдың таралу сипатына сәйкес келеді.

5-суретте қуаттың қашықтық логарифміне тәуелді төмендеуі көрсетілген. Логарифмдік координаттарда бұл тәуелділік түзу сызыққа жақын. ENV1-ENV3 нәтижелері әртүрлі қоршаған орта жағдайларында сигналдың әлсіреу деңгейі өзгеретінін көрсетті.

Әлсіреу коэффициенті қалыпты жағдайдағы мәннен жоғары болды. Бұл жарықтың талшыққа жеткіліксіз тиімді енгізілуімен, толқын ұзындығының сәйкес келмеуімен және қабылдау бөлігіндегі шығындармен байланысты болуы мүмкін.

Зерттеу нәтижелері энергияны оптика-

лық талшық арқылы қашықтыққа жеткізу мүмкіндігін растады. Дегенмен, жүйенің тиімді жұмыс істеуі үшін толқын ұзындығын дұрыс таңдау, жарықты талшыққа енгізу сапасын арттыру және энергия мен деректерді бір уақытта жеткізу әдістерін одан әрі дамыту қажет.

Жалпы алғанда, талшық ұзындығы артқан сайын шығындар да өседі. 5-10 м аралығында шығын салыстырмалы түрде аз болып, шамамен 9% құрады. Бұл қысқа қашықтықта жүйенің тұрақты жұмыс істей алатынын көрсетеді.

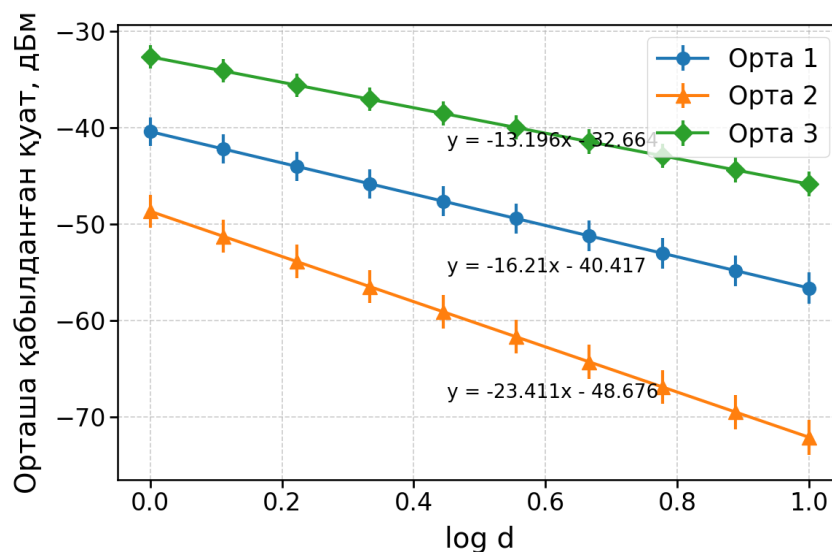
25 м қашықтықта шығыс қуатының айтарлықтай төмендеуі байқалды. 50 м қашықтықта қуат шамамен екі есе азайды. Бұл құбылыс талшықтағы шашырау үдерістерімен және кіріс/шығыс нүктелеріндегі жоғалтулармен түсіндіріледі.

Бұл тәжірибеде 650 нм толқын ұзындығы мен MMF G.651 талшығы қолданылды. Осы жағдайда жүйенің оңтайлы жұмыс аралығы шамамен 10-25 м екені анықталды. Қашықтықты одан әрі арттыру үшін толқын ұзындығын өзгерту, талшық сапасын жақсарту және фототүрлендіргіш тиімділігін арттыру қажет.

Қорытынды

Бұл жұмыста 650 нм толқын ұзындығындағы жартылай өткізгіш лазерлер мен кремний фототүрлендіргішін пайдалана отырып, талшықты-оптикалық қуат беру жүйесі тәжірибелік түрде зерттелді. Шығыс электр қуатының арна ұзындығы мен беру қашықтығына тәуелділігі сандық түрде анықталды.

Тәжірибе барысында шығыс қуатының төмендеуі байқалды, бұл жүйедегі энергия



5-сурет – Сызықтық жуықтаумен әртүрлі қоршаған орта жағдайлары үшін орташа қабылданған қуаттың қашықтық логарифміне тәуелділігі

шығындарының бар екенін растайды. Логарифмдік модель бойынша $n = 1,32-2,34$ аралығындағы мәндер алынды, бұл теориялық заңдылықтармен сәйкес келеді.

Жүйенің тиімді әлсіреу коэффициенті ($\alpha \approx 0,0127 \text{ м}^{-1} \approx 55 \text{ дБ/км}$ сәйкес келеді) стандартты көп режимді талшық үшін теориялық мәндерден айтарлықтай жоғары екені анықталды. Бұл сәйкессіздік жарықтың талшыққа тиімсіз қосылуын, көздің толқын ұзындығы мен жұмыс істейтін мөлдірлік терезелері арасындағы спектрлік сәйкессіздікті және фотоконверсия шығындарын қоса алғанда, жүйенің шығындарының үйлесіміне байланысты екені көрсетілген.

Зерттеу нәтижелері энергияны оптикалық талшық арқылы беру мүмкіндігін растады. Жүйе 10-25 м аралығында тиімді жұмыс істейтіні анықталды. Мұндай шешімдерді

сенсорлық, мониторинг және бақылау жүйелерінде қолдануға болады.

Болашақ зерттеулер үшін бірнеше бағыт ұсынылады. Толқын ұзындығын телекоммуникациялық диапазонға (1310/1550 нм) ауыстыру фототүрлендіргіш тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бірмодалы талшықты қолдану шығындарды азайтуға ықпал етеді. Сонымен қатар, энергия мен деректерді бір уақытта беретін гибриді жүйені әзірлеу келесі маңызды зерттеу бағыты болып табылады.

Жұмыс ҚР Ғылым және жоғары білім комитетінің гранттық қаржыландыруы аясында жүргізілді – ЖТН АР26195899 «Талшықты-оптикалық өткізгіш арқылы энергия мен ақпарат параметрлерін бір уақытта берудің жетілдірілген жүйесін әзірлеу» жобасы.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Нешина Е.Г., Мехтиев А.Д., Югай В.В., Калиаскаров Н.Б. Исследование систем передачи энергии по оптическому волокну // Труды университета. – 2023.
2. Helmers H., Armbruster C., von Ravenstein M. et al. 6-W Optical Power Link With Integrated Optical Data Transmission // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020.
3. Калюта В.А., Мехтиев А.Д. Волоконно-оптические технологии в системах мониторинга // Вестник технического университета. – 2022.

Исследование системы передачи энергии посредством волоконно-оптических линий связи

¹**НЕШИНА Елена Геннадьевна**, к.т.н., зав. кафедрой, e.neshina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>,

¹**ЮГАЙ Вячеслав Викторович**, PhD, зав. кафедрой, slawa_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7249-2345>,

¹**КАЛЫТКА Валерий Александрович**, PhD, профессор, v.kalytka@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3232-1285>,

^{1,2}***МУКАШЕВА Динара Талгатовна**, докторант, главный специалист Управления научно-исследовательской работы и обучения, dinara_north@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9064-2711>,

³**УСАБАЕВ Данияр Маратович**, директор, 22082@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5578-8866>,

¹Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан,

²ТОО «220 VOLT», Караганда, Казахстан,

³Казахстанский институт стандартизации и метрологии, Астана, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В статье описана схема передачи электроэнергии по оптоволоконному кабелю для питания удаленных датчиков и маломощной электроники. Приведена структурная

схема лабораторной установки, методика проведения экспериментов. В экспериментах применялись полупроводниковые лазеры с длиной волны 650 нм и фотопреобразователь. Определены экспериментальные выходные электрические характеристики и эффективность передачи энергии. По результатам работы разработана идея системы совместной передачи энергии и информации по оптоволоконному кабелю для задач мониторинга и телеметрии.

Ключевые слова: оптическое волокно, передача энергии, фотопреобразователь, лазерное излучение, гальваническая развязка.

Research of Energy Transmission System Via Fiber-optic Communication Lines

¹**NESHINA Yelena**, Cand. of Tech. Sc., Head of Department, e.neshina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>,

¹**YUGAI Vyacheslav**, PhD, Head of Department, slawa_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7249-2345>,

¹**KALYTKA Valery**, PhD, Professor, v.kalytka@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3232-1285>,

^{1,2}***MUKASHEVA Dinara**, Doctoral Student, Chief Specialist of the Research and Training Department, dinara_north@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9064-2711>,

³**USSABAYEV Daniyar**, Director, 22082@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5578-8866>,

¹Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,

²«220 VOLT» LLP, Karaganda, Kazakhstan,

³Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology, Astana, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. This paper demonstrates a power transmission through a fiber optic cable. Power is transmitted as light from a 650 nm laser. Light is converted to electrical power after passing through the fiber. Voltage and current were measured. Results demonstrate that this approach can be used to power miniature sensors. In addition, the same fiber may also be employed for data transmission.

Keywords: optical fiber, energy transmission, photoconverter, laser radiation, galvanic isolation.

REFERENCES

1. Neshina E.G., Mekhtiyev A.D., Yugay V.V., Kaliaskarov N.B. Issledovanie sistem peredachi energii po opticheskomu voloknu // Trudy universiteta. – 2023.
2. Helmers H., Armbruster C., von Ravenstein M. et al. 6-W Optical Power Link With Integrated Optical Data Transmission // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020.
3. Kalyuta V.A., Mekhtiev A.D. Volokonno-opticheskie tekhnologii v sistemakh monitoringa // Vestnik tekhnicheskogo universiteta. – 2022.