

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 2 (2025)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/NRPL3020>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/WFEC5075>

**К. Н. Тайсариева¹, *Г. С. Джобалаева², Е. Таштай³,
К. Б. Мүсілімов⁴, І. Н. Исақожаева⁵**

^{1,2,3,4,5}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4709-3980>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8401-7541>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8319-7288>

*e-mail: g.jobalayeva@satbayev.university

КӨПСАТЫЛЫ ИНВЕРТОРДЫҢ МИНИМАЛДЫ THD АУЫСУ БҰРЫШЫН АНЫҚТАУ ӘДІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл ғылыми мақалада кілттік коммутаторларды қолдану арқылы синусоидалық кернеу мен шығыс тогының сапасын жақсарту мәселесі қарастырылады. Көпсатылы инвертордың транзисторлары үшін кілттік коммутация бұрыштарын таңдау, олардың бұрмалану коэффициентін төмендету және шығыс кернеуінің синусоидалық формаға барынша жақын болуын қамтамасыз ету мәселелері зерттелді.

Сонымен қатар, бұрмалану коэффициентін (THD) төмендету мақсатында коммутация бұрыштарын есептеудің әртүрлі әдістері талданып, зерттелді. Әр әдіс бойынша есептеулер жүргізіліп, нәтижелері салыстырмалы түрде бағаланды. Талдау нәтижесінде тек негізгі ауысу бұрыштарын анықтау қажеттігі анықталды.

Транзисторлардың ауысу бұрыштарын есептеу әдістері зерттеліп, олардың ішінде Тең фазалық әдіс (EP), Жартылай эквивалентті фаза әдісі (HEP), Жартылай биіктік әдісі (HN), Тікелей жіберу әдісі (FF) сияқты тәсілдер қарастырылды. Айнымалы ток жүйелерінде қолданылатын негізгі факторлар мен белгілер сарапталды, ал деңгей санына қарай бұрыштар есептелді.

Ұсынылған әдістемеге жан-жақты талдау жасалып, оның MATLAB/Simulink бағдарламасындағы маңызды ерекшеліктері

зерттелді. Көпсатылы инвертордың транзисторлық кілттері MATLAB/Simulink ортасында модельденді.

Бұл мақалада зерттеулер Қазақстан Республикасы Жоғары Білім және Ғылым министрлігінің 2023-2025 жылдарға арналған Ғылыми және ғылыми техникалық жобалар бойынша ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру аясында жүзеге асырылған. Жоба тақырыбы: АР19679602 «Жиілік ауысуы жоғары және жоғары кернеуді түрлендіру коэффициенті бар инвертормен қос мақсатты байланыстыратын біріктірілген мультикоптер платформасын жасау» қаржыландыру тақырыбы бойынша жасалған.

Кілтті сөздер: бұрмалану коэффициенті, мультидеңгейлі, THD, коммутациялау бұрыштары, көпсатылы, инвертор.

Кіріспе

Транзисторлық түрлендіргіштердің негізгі тұжырымдамасы – коммутаторларды пайдалану арқылы синусоидалық кернеу мен шығыс тогының сапасын арттыру. Көптеген қосқыштардың тізбектей қосылуы нәтижесінде, транзисторлық түрлендіргіштердегі ауысу бұрыштары ерекше маңызға ие, себебі барлық қосқыштар шығыс кернеуін тұрақтандырып, гармоникалық токтың бұрмалануын барынша төмендету үшін үйлесімді түрде жұмыс істеуі қажет.

THD деңгейлер санын көбейту арқылы азаяды. Төмен THD шығыс кернеуі қажет екені анық, бірақ деңгейлерді арттыру үшін көбірек аппараттық құрал қажет және басқару қиынырақ болады [1, 74–85-б.].

Материалдар мен әдістері

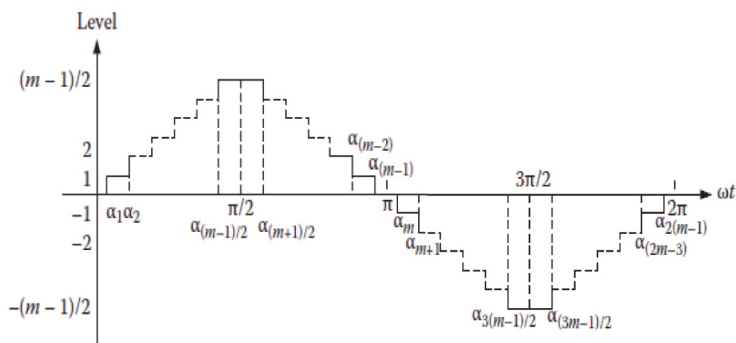
Көп деңгейлі инверторлардың әртүрлі құрылымдары мен көптеген артықшылықтары бар. Алайда, қолданыстағы инверторлардың басым бөлігі гармоникалық бұрмалану (THD) деңгейінің жоғары болуына байланысты сапалы айнымалы ток шығара алмайды, себебі деңгейлердің ауысу бұрыштары ретсіз орналасқан. Электр энергиясының сапасын (PQ) арттыру үшін, ауысу бұрыштарының дұрыс орналасуын мұқият қарастырып, THD мәнін барынша төмендету қажет.

Ауыстыру бұрышы – деңгейді өзгерту сәтін анықтайтын параметр. Бірінші суретте көрсетілгендей, m дәрежелі (m – тақ сан) сигналдың 0° – 90° аралығындағы периоды үшін $2(m - 1)$ қосылу бұрышын есептеу қажет. Бұл бұрыштар $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{m-2}, \alpha_{m-1}$ ретімен анықталады [2, 143-147-бб.].

Синусоидалық толқынның симметриялы құрылымына байланысты оның теріс жарты периоды оң жарты периодының орталық симметриясына сәйкес келеді. Сонымен қатар, екінші тоқсанның толқыны оң жарты периодтың

толқынымен айналы симметриялы, ал бірінші квадранттағы толқын екінші тоқсанның толқынымен айналы симметриялы болып табылады.

Негізгі ауысу бұрыштары ретінде 0° - 90° аралығындағы бірінші квадранттағы бұрыштар алынады.



1-сурет – Көпсатылы түрлендіргіштің кернеуінің шығысындағы кернеулік нәтижесі

m -деңгейлі сигналдың формасы үшін (m - тақ сан болған жағдайда) негізгі ауысу бұрыштарының саны $(m - 1)/2$ болады [3, 921–923-бб.].

Суретке қарасақ . 1, бізде келесі қатынастарды көруге болады:

– Бірінші квадранттағы негізгі ауысу бұрыштары (яғни 0° - 90°):

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{(m-1)/2}$$

– Бұрыштар екінші квадранттағы ауысу (яғни 90° - 180°):

$$\alpha_{(m+1)/2} = \pi - \alpha_{(m-1)/2}, \dots, \alpha_{(m-1)} = \pi - \alpha_1$$

– Бұрыштар үшінші квадранттағы ауысу (яғни 180° - 270°): $= \pi - \alpha$

$$\alpha_m = \pi + \alpha_1, \dots, \alpha_{3(m-1)/2} = \pi + \alpha_{(m-1)/2}$$

– Бұрыштар төртінші квадранттағы ауысу (яғни 270° - 360°):

$$\alpha_{3(m-1)/2} = 2\pi - \alpha_{(m-1)/2}, \dots, \alpha_{2(m-1)} = 2\pi - \alpha_1$$

Талдаудан біз тек негізгі ауысу бұрыштарын анықтауымыз керек. Басқа ауысу бұрыштарын бірінші квадранттағы негізгі ауысу бұрыштарынан алуға болады (яғни $0^\circ - 90^\circ$) [6].

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{(m-1)/2}$$

Транзисторлардағы ауысу бұрышын анықтау әдістерін зерттеу

Тең фазалық әдіс (EP)

Бірдей фазалық әдіс (EP) $0-\pi$ диапазонында ауысу бұрыштарын орта есеппен бөлу үшін қарапайым идеядан алынады. Ауыстырудың негізгі бұрыштары формула бойынша анықталады:

$$\alpha_i = i \frac{180^\circ}{m} \text{ мұнда } i = 1, 2, \dots, \frac{m-1}{2} \quad (1)$$

Жартылай эквивалентті фаза әдісі (HEP)

EP әдісімен анықталған көпдеңгейлі толқын пішіні үшбұрышты толқынға ұқсас әрі өте тар болып көрінетіндіктен, негізгі ауысу бұрыштарын тиімді ұйымдастыру үшін жартылай эквивалентті фазалық әдіс (HEP) қолданылады. Бұл әдіс кеңірек және сапасы жоғары шығыс сигналын алуға мүмкіндік береді [4, 496-502 бб.].

Ауыстырудың негізгі бұрыштары $0-\pi/2$ диапазонында, олар формула бойынша анықталады:

$$\alpha_i = i \frac{180^\circ}{\frac{m+1}{2}} = i \frac{180^\circ}{m+1} \text{ мұнда } i = 1, 2, \dots, \frac{m-1}{2} \quad (2)$$

Жартылай биіктік әдісі (HN)

Жоғарыда аталған екі әдіс коммутацияның негізгі бұрыштарын қарапайым түрде реттеуге мүмкіндік бергенімен, олардың шығыс сигналы толығымен синусоидалық бола алмайды. Синус функциясына сәйкес, негізгі ауысу бұрыштарын анықтау үшін жаңа жартылай биіктік (HN) әдісі ұсынылды.

Бұл әдістің негізгі идеясы – сигнал деңгейінің биіктігінің жартысына жеткен сәтінде ауысу бұрышын белгілеу. Осылайша, толқындық пішіннің сапасы жақсарып, шығыс сигналы синусоидалық формаға барынша жақындайды [5, 455–470-бб.].

Негізгі ауысу бұрыштары келесі формула арқылы анықталады:

$$\alpha_i = \sin^{-1} = \left[\left(i - \frac{1}{2} \right) \frac{2}{m-1} \right] = \sin^{-1} \left(\frac{2i-1}{m-1} \right) \text{ мұнда } i = 1, 2, \dots, \frac{m-1}{2} \quad (3)$$

Тікелей жіберу әдісі (FF)

Жоғарыда аталған үш әдісті қолдану нәтижесінде, оң жарты период пен теріс жарты период арасында айтарлықтай алшақтықтар бар екені байқалды. Бұл үзілістерді азайту және толқын формасының біркелкілігін арттыру мақсатында, негізгі ауысу бұрыштарын анықтауға арналған жаңа әдіс – тікелей бағыттау әдісі (FF) ұсынылды [6, 300–320-бб.].

Бұл әдіс толқындық пішіндегі үзілістерді азайтуға бағытталған және негізгі ауысу бұрыштарын формула бойынша есептеу арқылы анықтауға мүмкіндік береді:

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \sin^{-1} = \left[\left(i - \frac{1}{2} \right) \frac{2}{m-1} \right] = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{2i-1}{m-1} \right) \text{ мұнда } i = 1, 2, \dots, \frac{m-1}{2} \quad (4)$$

Нәтижелер және талқылау

$m = 3$ болған жағдайда, тек бір негізгі ауысу бұрышы α_1 болады, оның мәндері 1-кестеде көрсетілген.

$m = 5$ болған кезде, екі негізгі ауысу бұрышы α_1 және α_2 анықталып, олардың салыстырмалы мәндері 2-кестеде келтірілген.

$m = 7$ -де бізде үш негізгі ауысу бұрышы бар α_1 , α_2 , және α_3 3-кестеде.

$m = 9$ -да бізде төрт негізгі ауысу бұрышы бар α_1 , α_2 , α_3 , және α_4 4-кестеде.

$m = 11$ -де бізде бес негізгі ауысу бұрышы бар α_1 , α_2 , α_3 , α_4 және α_5 5-кестеде.

$m = 13$ -те бізде алты негізгі ауысу бұрышы бар α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 және α_6 6-кестеде.

1-кесте – $m = 3$ жағдайында α_1 ауысу бұрышы үшін әртүрлі әдістердің салыстырмалы нәтижелері көрсетілген.

Әдістердің түрлері	α_1 (°) бұрышы	THD
Тең фазалық әдіс	60°	80.17%
Жартылай эквивалентті фаза әдісі	45°	48.19%
Жартылай биіктік әдісі	30°	30.9%
Тікелей жіберу әдісі	15°	31.76%

2-кесте – ($m=5$) ауыстыру бұрыштағы әдістерді салыстырмалы қарастырамыз.

Әдістер	α_1 (°) ауыстыру бұрышы	α_2 (°) ауыстыру бұрышы	THD
Теңфазалық әдіс	36°	72°	42.77%
Жартылай эквивалентті фаза әдісі	30°	60°	31.78%

Әдістер	α_1 (°) ауыстыру бұрышы	α_2 (°) ауыстыру бұрышы	THD
Жартылай биіктік әдісі	14.48°	49°	21.14%
Тікелей жіберу әдісі	7.24°	24.5°	24.86%

3-кесте – ($m=7$) ауыстыру бұрыштағы әдістерді салыстырмалы қарастырамыз.

Әдістер	α_1 (°)	α_2 (°)	α_3 (°)	THD
Тең фазалық әдіс	25.71°	51.43°	77.14°	30.98%
Жартылай эквивалентті фаза әдісі	22.5°	45.00°	67.50°	31.29%
Жартылай биіктік әдісі	9.60°	30.00°	56.44°	11.70%
Тікелей жіберу әдісі	4.80°	15.00°	28.22°	22.17%

4-кесте – ($m=9$) ауыстыру бұрыштағы әдістерді салыстырмалы қарастырамыз.

Әдістер	α_1 (°)	α_2 (°)	α_3 (°)	α_4 (°)	THD
Тең фазалық әдіс	20.00°	40.00°	60.00°	80.00°	25.37%
Жартылай эквивалентті фаза әдісі	18.00°	36.00°	54.00°	72.00°	22.06%
Жартылай биіктік әдісі	7.20°	22.00°	38.70°	61.10°	8.37%
Тікелей жіберу әдісі	3.60°	11.00°	19.30°	30.50°	21.30%

5-кесте – ($m=11$) ауыстыру бұрыштағы әдістерді салыстырмалы қарастырамыз.

Әдістер	α_1 (°)	α_2 (°)	α_3 (°)	α_4 (°)	α_5 (°)	THD
Тең фазалық әдіс	16.36°	32.72°	49.09°	65.45°	81.81°	22.62%
Жартылай эквивалентті фаза әдісі	15.00°	30.00°	45.00°	60.00°	75.00°	20.16%
Жартылай биіктік әдісі	5.74°	17.46°	30.00°	44.43°	64.16°	7.72%
Тікелей жіберу әдісі	2.87°	8.73°	15.00°	22.21°	32.08°	21.24%

6-кесте – ($m=13$) ауыстыру бұрыштағы әдістерді салыстырмалы қарастырамыз.

Әдістер	α_1 (°)	α_2 (°)	α_3 (°)	α_4 (°)	α_5 (°)	α_6 (°)	THD
Тең фазалық әдіс	13.85°	27.69°	41.54°	55.38°	69.23°	83.08°	20.25%
Жартылай эквивалентті фаза әдісі	12.86°	25.71°	38.57°	51.43°	64.29°	77.14°	18.74%
Жартылай биіктік әдісі	4.78°	14.48°	24.62°	35.69°	48.59°	66.44°	7.25%
Тікелей жіберу әдісі	2.39°	7.24°	12.31°	17.85°	24.29°	33.22°	21.00%

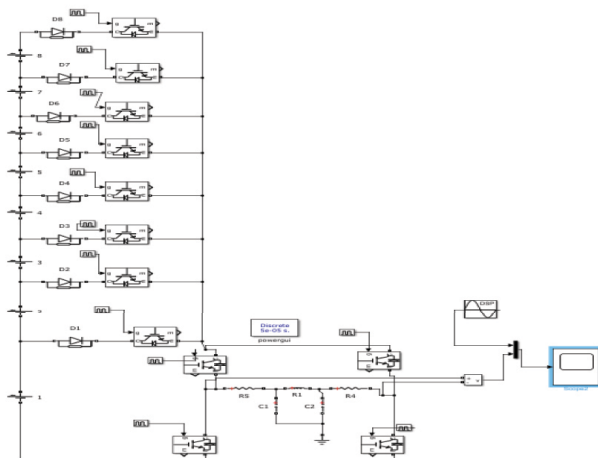
MATLAB/Simulink бағдарламасында көп сатылы инвертордың транзисторлық кілттерін модельдеу. Simulink – әртүрлі жүйелерді Модельдеуге арналған модульдік құрылым жүйені жобалау, модельдеу, кодты автоматты түрде генерациялау, үздіксіз тестілеу және ендірілген жүйелердің сенімділігін қамтамасыз ету процесін қолдайды. Simulink пакеті – MATLAB бағдарламасының қосымша модулі болып табылады. Simulink көмегімен модельдеу визуалды бағдарламалау қағидатына негізделген, бұл пайдаланушыға стандартты блоктық кітапханалардан құрылғы моделін құруға және есептеулер жүргізуге мүмкіндік береді [7, 40–45–66.].

Дәстүрлі модельдеу әдістерінен айырмашылығы, бұл тәсіл пайдаланушыдан бағдарламалау тілдері мен математикалық сандық әдістерді терең меңгеруді талап етпейді, жалпы техникалық білім жеткілікті.

Көпсатылы инвертор – бірнеше тұрақты ток көздерінен синусоидалық кернеуді синтездейтін қуатты электронды жүйе. Тұрақты ток көздері ретінде аккумуляторлар, күн батареялары, ультраконденсаторлар және басқа да энергия көздері қолданылады. Көпсатылы инвертордың негізгі принципі – ажыратқыштарды қолдану арқылы шығыс кернеуі мен тогының сапасын жақсарту.

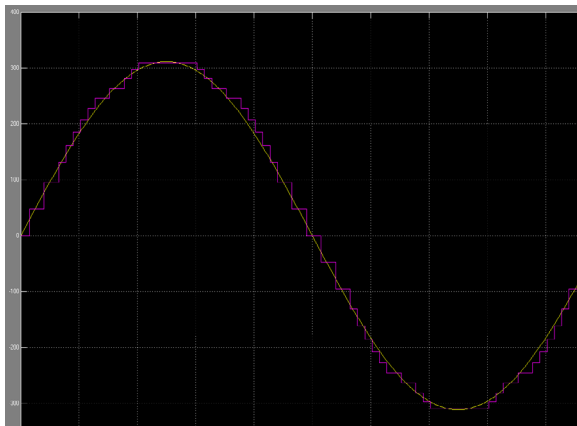
Қосқыштар тізбектей қосылғандықтан, көпсатылы инверторларда ауысу бұрыштарының рөлі маңызды. Барлық қосқыштар үйлесімді жұмыс істеуі тиіс, осылайша шығыс кернеуі мен токтың гармоникалық бұрмалануы (THD) барынша төмендетіледі.

Төменде көпсатылы инвертордың имитациялық моделі көрсетілген [8, 50–53–66.].



2-сурет – Инвертордың көпсатылы имитациялық моделі

Көпсатылы инвертордың транзисторларының коммутациялау бұрыштары жоғарыдағы есептеулер негізінде анықталып, осы мәндер бағдарламалық ортаға енгізіліп, модельдеу жүргізілді [9, 300–315-бб.].



3-сурет – Көпсатылы инвертордың шығыс кернеуі

Спектрлік талдау нәтижелері көрсеткендей, шығыс кернеуінің құрамында амплитудасы негізгі гармониканың 5 %-нан аспайтын 3, 5, 7-гармоникалар кездеседі. Сонымен қатар, бұрмалану коэффициенті (THD) = 4,62 % болып анықталды.

Ұсынылған нәтижелерге сәйкес, деңгей санының артуымен шығыс кернеуінің қисығы синусоидалық формаға жақындайды, яғни бұрмалану коэффициенті төмендейді. Жоғары кернеулі гармоникалар маңызды рөл атқарады және оларды конденсаторлар, сүзгілер немесе индуктивті жүктемелер арқылы жоюға болады [10, 50–63-бб.].

Қорытынды

Бұл мақалада жаңа шарттар негізінде ауысу бұрыштарын анықтау әдістері зерттелді. Есептеулер сызықтық емес теңдеулер жүйесі түрінде тұжырымдалды.

Теориялық талдау нәтижесінде ұсынылған әдіс пен дәстүрлі әдістер арасындағы THD деңгейіндегі айырмашылық зерттеліп, модуляция индексінің белгілі бір диапазонында тиімділігі дәлелденді.

Ұсынылған бағдарламаны пайдалану арқылы есептелген ауысу бұрыштары шығыс кернеуінің бұрмалану коэффициентін (THD) жақсартуға мүмкіндік береді. Өртүрлі модуляция индекстерінде жүргізілген модельдеу бұл әдістің негізгі мақсатына жетуін және THD төмендетудегі тиімділігін көрсетті.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Ding, K., Ka Wai Eric Cheng, and Zou, Y. P.** Analysis of an asymmetric modulation method for cascaded multilevel inverters // IET Power Electronics. – 2012. – 5. – No. 1. – P. 74–85.

2 **Илипбаева, Л. Б.**, Современные методы преобразования солнечной энергии в электроэнергию переменного напряжения // Международная научно-практическая конференция «Информационно-инновационные технологии : интеграция науки, образования и бизнеса». – Алматы, 2008. – С. 143–147.

3 **Грабовецкий, Г. В., Харитонов С. А., Преображенский, Е. Б., Резниченко, Ф. М., Попов, В. П., Красников, Ю. И., Берестов, В. М.** Некоторые тенденции в развитии приборов и устройства силовой электроники // Химия в интересах устойчивого развития. – 2001. – № 9. – С. 921–923.

4 **Черных, И. В.** Simulink среда создания инженерных приложений. – М. : Диалог – МИФИ, 2004. – 496 с.

5 **Дьяконов, В. П.** MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения: полное руководство пользователя. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – С.455–470.

6 **Герман-Галкин, С. Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : учебное пособие. – СПб : КОРОНА, 2001. – 320 с.

7 **Евстифеев, А. В.** Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL. – М. : Издательский дом «Додэка XXI», 2008. – 45 с.

8 **Исембергенов, Н.Т., Молдахметов, С. С., Тайсариева, К. Н.** К вопросу о разработке системы управления силовым инвертором для индукционного нагрева // «STRATEGICZNE PYTANIA SWIATOWEJ NAUKI-2014». – Польша : Przemysl Nauka I studia, 2014. – С. 50–53.

9 **Anjali Krishna, R., Dr. L. Padma Suresh.** A brief review on multilevel inverter topologies» Conference on Circuit // Power and Computing Technologies [ICCPCT], 2016.

10 **Patel, Purnesh, Rejo Roy, Albert John Varghese, and Satyadharma Bharti.** A Review on Multilevel Inverter Having Switched Capacitor with Reduced Number of Insulated DC Supplies, 2022.

REFERENCES

1 **Ding, K., Ka Wai Eric Cheng, and Zou, Y. P.** Analysis of an asymmetric modulation method for cascaded multilevel inverters // IET Power Electronics. – 2012. – 5. – No. 1. – P. 74–85.

2 **Ilipbaeva, L. B.** Sovremennyye metody preobrazovaniya solnechnoy energii v elektroenergiyu peremennogo napryazheniya [Modern methods of converting solar energy into alternating voltage electricity] // International scientific and practical conference «Information and innovative technologies : integration of science, education and business». – Almaty, 2008. – P. 143–147.

3 **Grabovetskij, G. V., Haritonov, S. A., Preobrazhenskij, E. B., Reznichenko, F. M., Popov, V. P., Krasnikov, YU. I., Berestov, V. M.** Nekotorye tendencii v razvitii priborov i ustrojstva silovoj elektroniki [Some trends in the development of devices and devices of power electronics] // Chemistry in the interests of sustainable development. – 2001. –No. 9. – P. 921–923.

4 **Chernyh, I. V.** Simulink sreda sozdaniya inzhenernyh prilozhenij [Simulink environment for creating engineering applications]. – Moscow : Dialog – MEPI, 2004. – P. 496.

5 **D'yakonov, V. P.** MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Osnovy primeneniya: polnoe rukovodstvo pol'zovatelya [MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Fundamentals of application : a complete user's guide]. – M. : SOLON-Press, 2004. – P. 455–470.

6 **German-Galkin, S. G.** Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyyh sistem v MATLAB 6.0 : uchebnoe posobie [Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0 : textbook]. – St. Petersburg : KORONA, 2001. – P. 320.

7 **Evstifeev, A. V.** Mikrokontrollery AVR semejstv Tiny i Mega firmy ATMEL [AVR microcontrollers of the Tiny and Mega families of ATMEL]. – M. : Dodeka XXI Publishing House, 2008. – P. 45.

8 **Isebergenov N. T., Moldahmetov, S. S., Tajsarieva K. N.** K voprosu o razrabotke sistemy upravleniya silovym invertorom dlya indukcionnogo nagreva [On the development of a power inverter control system for induction heating] // «STRATEGICZNE PYTANIA SWIATOWEJ NAUKI-2014». – Poland : Przemysl Nauka I studia, 2014. – P. 50–53.

9 **Anjali Krishna, R., Dr. L. Padma Suresh.** A brief review on multilevel inverter topologies» Conference on Circuit // Power and Computing Technologies [ICCPCT], 2016.

10 **Patel, Purnesh, Rejo Roy, Albert John Varghese, and Satyadharma Bharti.** A Review on Multilevel Inverter Having Switched Capacitor with Reduced Number of Insulated DC Supplies, 2022.

01.06.24 ж. баспаға түсті.

15.04.25 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

К. Н. Тайсариева¹, *Г. С. Джобалаева², Е. Таштай³,

К. Б. Мүсілімов⁴, І. Н. Исақожаева⁵

^{1,2,3,4,5}Казахский национальный исследовательский технический

университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 01.06.24.

Поступило с исправлениями 15.04.25.

Принято в печать 03.06.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО УГЛА СДВИГА THD МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ИНВЕРТОРА

Основная цель этой научной статьи – улучшить синусоидальное напряжение и выходной ток с помощью переключателей клавиш. Рассмотрены углы переключения ключевого открытия транзисторов многоступенчатого инвертора, его небольшой коэффициент искажения и близость выходного напряжения к синусоидальной линии. Кроме того, с целью улучшения THD (коэффициента искажения) были проанализированы и исследованы различные методы для подсчета угла переключения. К рассмотренным методам были проведены расчеты для разных углов и проанализированы сравнительно. По анализу необходимо определить только основные углы перехода. Исследованы методы определения углов перехода на транзисторах. Изученные методы включают метод равных фаз (EP), метод Полуэквивалентной фазы (HEP), метод половинной высоты (HN), метод прямой передачи (FF). Были проанализированы факторы и симптомы, используемые в системах переменного тока. В зависимости от количества уровней рассчитывались углы. Был проанализирован предложенный метод и изучены его важные особенности в MATLAB/Simulink. Смоделировал транзисторные ключи многоступенчатого инвертора в MATLAB/Simulink.

В данной статье исследования осуществлены в рамках грантового финансирования научных исследований по научным и научно-техническим проектам Министерства высшего образования и науки Республики Казахстан на 2023–2025 годы. Тема проекта: AP19679602 «Разработка привязной унифицированной мультикоптерной платформы двойного назначения с инвертором с повышенной частотной коммутацией и высоким коэффициентом преобразования напряжения».

Ключевые слова: инвертор, коэффициент искажения, многоуровневый, THD, углы переключения, многоступенчатый.

*K. N. Taissariyeva¹, *G. S. Jobalayeva², E. Tashtay³,*

K. B. Mussilimov⁴, I. N. Issakozhayeva⁵

^{1,2,3,4,5}K. Satpayev Kazakh National Research Technical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 01.06.24.

Received in revised form 15.04.25.

Accepted for publication 03.06.25.

INVESTIGATION OF METHODS FOR DETERMINING THE MINIMUM SHEAR ANGLE THD OF A MULTISTAGE INVERTER

The main purpose of this scientific article is to improve the sinusoidal voltage and output current using key switches. The key opening switching angles of the transistors of a multi-stage inverter, the presence of a small distortion factor and the proximity of the output voltage to the sine line were considered. In addition, in order to improve the THD (distortion factor), various methods were analyzed and studied for counting the switching angle. The considered methods were analyzed in comparison, performing calculations for different angles. According to the analysis, it is necessary to determine only the main transition angles. Methods for determining the transition angles in transistors were studied. The methods studied are equal phase method (EP), semi-equivalent phase method (HEP), semi-elevation method (HN), direct transmission method (FF). The factors and symbols used in AC systems were analyzed. Angles were calculated depending on the number of levels. The proposed methodology was analyzed and its important features in MATLAB/Simulink were studied. In the MATLAB/Simulink program, the transistor keys of a multi-stage inverter were simulated.

In this article, the research was carried out as part of the grant financing of scientific research on scientific and scientific-technical projects of the Ministry of Higher Education and Science of the Republic of Kazakhstan for 2023–2025. Project topic: AR19679602 «Development of an integrated multi-copter platform combining dual purpose with an inverter with high frequency conversion and high voltage conversion ratio».

Keywords: inverter, distortion factor, multilevel, THD, switching angles, multistage.

Теруге 09.06.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 25,6. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4417

Сдано в набор 09.06.2025 г. Подписано в печать 30.06.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 25,6. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4417

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

Е-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz