

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ
МИНИСТРЛІГІ

Коммерциялық емес акционерлік қоғамы
ҒҰМАРБЕК ДӘУКЕЕВ АТЫНДАҒЫ АЛМАТЫ ЭНЕРГЕТИКА
ЖӘНЕ БАЙЛАНЫС УНИВЕРСИТЕТІ

«Электр машиналары және электр жетегі» кафедрасы

«Қорғауға жіберілді»

Кафедра меңгерушісі

т.ғ.к., профессор Оржанова Ж.К.

(аты-жөні, ғылыми дәрежесі, атағы)

« _____ » _____ 2021 ж.

(КОЛЫ)

МАГИСТЕРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Тақырыбы: Көп моторлы асинхронды синхронды айналмалы электр жетегі

Магистрант Әбілқанов Т.А.
КОЛЫ (А.Ж.Т.)

Ғылыми жетекшісі Цыба Ю.А.
КОЛЫ (А.Ж.Т.)

Пікір беруші _____
КОЛЫ (А.Ж.Т.)

Алматы, 2021ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ
МИНИСТРЛІГІ

Коммерциялық емес акционерлік қоғамы
ҒҰМАРБЕК ДӘУКЕЕВ АТЫНДАҒЫ
АЛМАТЫ ЭНЕРГЕТИКА ЖӘНЕ БАЙЛАНЫС УНИВЕРСИТЕТІ

Электр энергетика және электр техника институты
7M07101– Электр энергетикасы мамандығы
«Электр машиналары және электр жетегі» кафедрасы

магистрлік диссертацияны орындауға
ТАПСЫРМА

Магистрантқа Әбілқанов Тимур Асқарұлы
аты жөні

Диссертация тақырыбы Көп моторлы асинхронды синхронды
айналмалы электр жетегі
университеттің Ғылыми кеңесімен бекітілген №215 «30» қазан 2020 ж.

Аяқталған жұмысты тапсыру
мерзімі: «30» мамыр 2021ж.

Зерттеу мақсаты:

Жеке жиілік түрлендіргіштерінен қоректенетін тіректі кранның
қозғалыс механизмдерінің келісілген айналуының екі қозғалтқышты
асинхронды электр жетегінің жүйесін жасау және басқарудың оңтайлы
әдісін қолдана отырып динамикалық жүктемелердің төмендеуін
талдау

Магистерлік диссертациядағы әзірленуі тиіс сұрақтар тізімі
немесе магистрлік диссертацияның қысқаша мазмұны:

Айналада бірізділікті қамтамасыз ететін екі қозғалтқышты
асинхронды электр жетегін басқарудың линеаризацияланған құрылымдық
схемасын әзірлеу; екі қозғалтқышты электр жетегінің тұрақтылық
шартымен келісілген айналу динамикасын сипаттайтын математикалық
модель әзірлеу

Негізгі ұсынылатын әдебиеттер

Теличко Л. Я. Ограничение динамических нагрузок электромеханических
систем группы общепромышленных механизмов на металлургических
предприятиях: Дисс.докт.техн.наук. – Москва, 2006.; Удут Л.С., Мальцева
О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследо-вание автоматизированных
электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непре-рывных многоконтурных
систем управления электроприводов: учебное посо-бие – Томск: Изд-во ТПУ,
2007.. IJPT| Sep-2016 | Vol. 8 | Issue No.3 | Indian.; Герман – Галкин С.Г.
Matlab&Simulink: Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.:
«Корона Век», 2011.

Магистрлік диссертацияны дайындау
К Е С Т Е С І

Тарау аттары, әзірленетін сұрақтардың тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
Тіректі крандардың кинематикалық ерекшеліктері	03.12.2019	Орындалды
Тіректі крандардың қозғалу механизмдерінің жұмыс режимдері және оның қозғалыс механизмдерінің электр жетектеріне қойылатын талаптар	15.02.2020	Орындалды
Асинхронды қозғалтқыштың құрылымдық моделінің параметрлерін есептеу	23.04.2020	Орындалды
Қозғалмайтын координаттар жүйесіндегі құрылымдық модельдегі асинхронды қозғалтқыштың динамикалық және статикалық сипаттамаларын зерттеу	26.09.2020	Орындалды
MATLAB-да тіректі кранның қозғалыс механизмдерінің екі қозғалтқышты электр жетегін компьютерлік модельдеу	28.10.2020	Орындалды
"Жиілік түрлендіргіші – асинхронды қозғалтқыш" жүйесінің екі қозғалтқышты электр жетегіндегі жылдамдықтардың сәйкес келмеуі бойынша жалпы кері байланыс коэффициентін есептеу	11.02.2021	Орындалды
"ЖТ-АД" жүйесінің электр жетегі үшін басқару тәсілдерін зерттеу	15.03.2021	Орындалды
МТБ жүйелеріне арналған асинхронды қозғалтқыштың математикалық моделі	20.04.2021	Орындалды
МТБ жүйесіндегі өтпелі процестерді есептеу	28.05.2021	Орындалды

Тапсырманың берілген уақыты «10» қараша 2020 ж.

Кафедра меңгерушісі _____ *Оржанова Ж.К.*
(қолы)

Ғылыми жетекшісі _____ *Цыба Ю.А.*
(қолы)

Тапсырманы орындауға
қабылдаған магистрант _____

(қолы)

Әбілқанов Т.А.

Аңдатпа

Бұл диссертацияда тіректі кранның екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегін синхронды айналуы зерттелді. Бұл зерттеу жұмысында тіректі кранның ерекшеліктері, жалпыланған асинхронды машинаның математикалық сипаттамасы, электр жетектерін басқару әдістері және МТБ жүйесінің алгоритмі қарастырылды. Асинхронды электр қозғалтқышының құрылымдық схемасының параметрлерін есептеу, сәйкессіздік бойынша кері байланыстың жалпы коэффициентін есептеу, өтпелі процестерді есептеу жүргізілді.

Электр жетегін басқару әдістері үш жолмен жүзеге асырылды: скаляр, векторлық және моментті тікелей басқару. Әрі қарай зерттеу моментті тікелей басқарумен, басқарудың ең оңтайлы әдісімен жүргізілді.

МТБ жүйесінің жұмыс істеу алгоритмі қарастырылды, оның принципі статор кернеуінің тиісті басқару векторын таңдау арқылы статор ағыны мен электр қозғалтқышының электромагниттік моментін тікелей басқаруға негізделген.

Эксперименттік бөлік МТБ жүйесіндегі моментті шектей отырып жасалды, оны қолдану тіректі кранның қозғалу механизмінің тозуын азайтуға көмектеседі.

Аннотация

В этой диссертационной работе исследован двухдвигательный асинхронный электропривод синхронного вращения козлового крана. В данной исследовательской работе были рассмотрены особенности козлового крана, математическое описание обобщенной асинхронной машины, способы управления электроприводами и алгоритм работы системы ПУМ. Произведены расчет параметров структурной схемы асинхронного электродвигателя, расчет общего коэффициента обратной связи по рассогласованию, расчет переходных процессов.

Способы управления электропривода осуществлялось тремя способами: скалярное, векторное и прямое управление моментом. Дальнейшее исследование было произведено прямым управлением момента, самым оптимальным способом управления.

Рассмотрен алгоритм работы системы ПУМ, принцип которого основан на непосредственном управлении потокосцепления статора и электромагнитного момента электродвигателя посредством выбора соответствующего управляющего вектора напряжения статора.

Произведена экспериментальная часть с ограничением момента в системе ПУМ, применение которой способствует уменьшению износа механизма передвижения козлового крана.

Annotation

In this dissertation work, a two-motor asynchronous electric drive for synchronous rotation of a gantry crane is investigated. In this research paper, the features of the gantry crane, the mathematical description of the generalized asynchronous machine, the methods of controlling electric drives and the algorithm of the PUM system were considered. The parameters of the block diagram of an asynchronous electric motor, the calculation of the total feedback coefficient for misalignment, and the calculation of transients are calculated.

Methods of control of the electric drive was carried out in three ways: scalar, vector and direct torque control. Further investigation was made by direct control of the moment, the most optimal control method.

The algorithm of operation of the PUM system is considered, the principle of which is based on the direct control of the stator flow coupling and the electromagnetic torque of the electric motor by selecting the appropriate control vector of the stator voltage.

An experimental part was made with a moment limitation in the PUM system, the use of which helps to reduce the wear of the movement mechanism of the gantry crane.

Мазмұны

Кіріспе	11
1 Тіректі крандардың қозғалу механизмдерінің электр жетектерін пайдаланудың қазіргі жағдайы	16
1.1 Тіректі крандарының кинематикалық ерекшеліктері	16
1.2 Тіректі крандардың қозғалу механизмдерінің жұмыс режимдері	18
1.3 Қозғалыс механизмдерінің электр жетектеріне қойылатын талаптар	19
1.4 Электр жетектерін басқарудың қолданыстағы жүйелеріне шолу	21
1.5 Тіректі кранның қозғалыс механизмінің әртүрлі қозғалыстарындағы көлбеу күштердің пайда болу себептері	25
1.6 Міндеттер қою	33
2 MATLAB ортасында қысқа тұйықталған роторлы асинхронды электр қозғалтқышын модельдеу	35
2.1 Жалпыланған асинхронды машинаның математикалық сипаттамасы	35
2.2 Қозғалмайтын координаттар жүйесіндегі асинхронды қозғалтқыштың құрылымдық моделі	38
2.3 Асинхронды қозғалтқыштың құрылымдық моделінің параметрлерін есептеу	39
2.4 Қозғалмайтын координаттар жүйесіндегі құрылымдық модельдегі асинхронды қозғалтқыштың динамикалық және статикалық сипаттамаларын зерттеу	42
2.5 Айналмалы координаттар жүйесіндегі құрылымдық модельдегі асинхронды қозғалтқыштың динамикалық және статикалық сипаттамаларын зерттеу	45
3 Қозғалыс механизмдерінің екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің математикалық моделін жасау және зерттеу	49
3.1 "Жиілік түрлендіргіші - асинхронды қозғалтқыш (АД)» жүйенің бір қозғалтқышты электр жетегінің математикалық сипаттамасы	49
3.2 "Жиілік түрлендіргіші – асинхронды қозғалтқыш" жүйесінің жылдамдығы бойынша кері байланыс коэффициентін есептеу әдістемесі»	50
3.3 "Жиілік түрлендіргіші-асинхронды қозғалтқыш" жүйесінің екі қозғалтқыш электр жетегіндегі жылдамдықтардың сәйкес келмеуі бойынша жалпы кері байланыс коэффициентін есептеу»	55
3.4 MATLAB-да тіректі кранның қозғалыс механизмдерінің екі қозғалтқышты электр жетегін компьютерлік модельдеу	59

3.5 "ЖТ-АҚ" жүйесінің электр жетегі үшін басқару тәсілдерін салыстыру»	62
4 "ЖТ-АҚ" жүйесі үшін ешкі кранының қозғалу механизмінің моментін тікелей басқаруды зерттеу	71
4.1 Асинхронды қозғалтқыштың математикалық сипаттамасын таңдау	71
4.2 МТБ жүйелеріне арналған асинхронды қозғалтқыштың математикалық моделі	73
4.3 Айнымалы ток электржетегінің ПУМ принципінің алгоритмі	76
4.4 МТБ жүйесінің функционалдық жұмысының сипаттамасы	80
4.5 ПУМ жүйесіндегі өтпелі үдерістерді есептеу	83
4.6 Моментті шектеу функциясымен тікелей моментті басқаруды іске асырудың эксперименттік бөлігі	87
Қорытынды	90
Қысқартулар тізімі	91
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	92

Кіріспе

Өзектілігі.

Өнеркәсіпте әртүрлі жұмыс механизмдерін шарттауына байланысты электржетектері жұмыс режимдері мен бағытталуына қарай бірнеше топқа бөлінеді. Жұмыс кезінде жиі және үлкен динамикалық жүктемелер пайда болатын механизмдер арнайы топқа жататын болып табылады. Өнеркәсіптік кәсіпорындар жабдықтарының бұл тобына бірінші кезекте көтеру-тасымалдау механизмдері кіреді: көпір түріндегі крандар, кран тиегіштер, транспортерлер, конвейерлер, қоректендіргіштер және т. б. Осы механизмдердің ішінде көпір типіндегі крандар ең ауыр жағдайларда және қарқынды режимде жұмыс істейді. Бұл механизмдердің динамикалық шамадан тыс жүктелуінің негізгі себептері - қоршаған ортаның қиын жағдайларында қарқынды қайта-қысқа мерзімді жұмыс режимдерінің, жүйенің серпімді механикалық тербелістерінің және қолданылатын электр жетектерін басқару жүйелерінің жетілмегендігіне байланысты саңылаулары бар серпімді механикалық байланыстардың болуы.

Зерттеу нәтижелерінің көпшілігі ауыр жүктемелерде пайда болатын жиі серпімді механикалық тербелістер электр жетегінің теріс сипатын тудыратындығын дәлелдеді. Нәтижесінде үлкен динамикалық әсерлер, механизмнің дәлдігі, механикалық тербелістер және қауіпті резонанстық құбылыстар пайда болады. Бұл жағдайда пайда болатын динамикалық жүктемелердің тым жоғары деңгейі, әсіресе іске қосу, кері қайтару және тежеу кезінде, крандар мен кран құрылымдарының механизмдерінің элементтерінің мерзімінен бұрын тозуына және бұзылуына әкеледі.[1]

Тіректі крандар көпір типіндегі крандардың бір түрі болып табылады, олардың көпірі екі тіректің көмегімен кран жолына сүйенеді. Осы түрдегі крандарда көпір крандарына қатысты әзірленген типтік жетектер, электр жабдықтары және басқару кабиналары қолданылады. Дегенмен, кейбір құрылымдық іске асырулардың ортақтығымен қатар, ұзындығы айтарлықтай және сезімтал болатын көпірлерде консольдердің (бір консоль және екі консоль) болуымен ашық ауада ерекше жұмыс істеуге байланысты тіректі крандардың ерекшеліктерін ескерген жөн[2].

Тіректі крандарының электр жетектерін құру және оңтайландыру мәселелері мамандардың кең назарын аударады. Н.А. Лобовтың, Н.А.Дорофеевтің, С. С. Добронравойдың, Д. А. Зотовтың еңбектерінде ешкі крандарының электр жетектерінің электромеханикалық процестері зерттелді, жетек қозғалтқыштарындағы жүктемелерді теңестірудің негізгі әдістері, электр жетектерін басқарудың тиімді әдістерінің жолдары анықталды, жаңа электр жетектерінің жүйелерін құру бойынша техникалық ұсыныстар жасалды.

Тіректі крандар механизмдердің жұмысын қамтамасыз ететін көптеген электр қозғалтқыштарымен орындалады. Олардың ішінде тіректі кранның көлденең қозғалысын қамтамасыз ететін электр жетектері бар. Бұл қозғалыс механизмдері болып табылады.

Тіреуіш крандардың көлденең қозғалу механизмдері тек бөлек жетектермен орындалады. Жетектер тіректі кранның тірек бөлігі болып табылатын тіректердің түбіне орнатылады. Бұл механизмге қойылатын негізгі талап-электр жетектерінің бірдей айналу жылдамдығымен кран тіректерінің келісілген қозғалысы. Сондықтан, осы талаптың негізінде жетектерді үйлестірудің арнайы жүйесін қолдану қажет. Кранның тек қана қозғалыс механизмдері сәйкестік немесе синхрондау жүйесі қажет. Тиісті жүйені қолдану қозғалыс кезінде кран көпіріне жүктеме біркелкі бөлінбеген кезде (жүктің тербелісі, желдің желкенділігі және т.б.) электр қозғалтқыштарының механикалық сипаттамаларының сәйкестігін бұзудың салдары болып табылатын тіректерді кесу мүмкіндігін жоюға байланысты. Қозғалыс механизмдерінде электр қозғалтқыштарының айналу жылдамдығы сәйкес келмеген жағдайда, тіреуіш кран рельстерден шығып, жүріс доңғалақтарының, кран асты жолдарының меншікті ребордтарының тозуына ұшырайды [3].

Қозғалыс механизмдерінің электр жетектеріне әсер ететін факторлардың бірі - жел жүктемесі. Жел жүктемесінің желкенділігі электр қозғалтқышының статикалық моментіне айтарлықтай дәрежеде әсер етуі мүмкін. Мысалы, кран құрылымының массасының 1 тоннасына 200-350 Н жел күшінің қысымы массаның 1 тоннасына 70-100 Н үйкеліс кедергісінен едәуір асып түседі.

Тіректі крандарының қозғалыс механизмдерінде басқару жүйелерінің бірнеше түрлері қолданылды: реле-контактор, дроссель және жиілікті-реттелетін.

Қазіргі уақытта тіректі крандар үшін электр жетегінің кең таралған түрі-қуат контроллері немесе қарапайым релелік-контакторлық жүйелер арқылы реостатикалық басқарумен фазалық роторлы индукциялық қозғалтқыш (ad FP) негізіндегі электр жетегі. Бұл крандардың қызмет ету мерзімі ондаған жылдарға созылатындығына байланысты, ал тіректі крандардың көпшілігі кеңес өкіметі кезеңінде шығарылды. Бұл жүйеге қозғалыс механизмдерін үйлестіру функциясы да кіреді. Реле-контакторлы басқару жүйелерін пайдалану крандардың жұмыс жағдайларына байланысты: троллейлі қуат жүйесі, жоғары өткізгіш шаң, ылғалдылық, газдану, жоғары температура және оның ұшу ұзындығындағы күрт ауытқуы, кранның жоғары қарқындылығы, ұзақ уақыт пен қосылу жиілігімен сипатталады. Алайда, оның кең қолданылуына қарамастан (роторларды электрлік үйлестіру арқылы), бұл тиімсіз.

Бұл көптеген факторларға байланысты. Біріншіден, қозғалтқышты жеделдету процесінде іске қосу кедергілерінің сатыларын ауыстыру оның моментінің күрт өзгеруіне және токтардың үлкен шектерде лақтырылуына әкеледі, бұл қадамдар санының азаюымен күшейеді. Бұл серпімді механикалық тербелістердің пайда болуына және өтпелі процестердің тегістігін бұзуға әкелуі мүмкін.

Екіншіден, салыстырмалы түрде үлкен ұзындығы (25 метр) бар тіректі крандарға арналған көп қозғалтқышты электр жетегінің жүйелерін пайдалану кезінде релелік-контакторлық жүйенің түйіспелерін бір уақытта жабу әр асинхронды қозғалтқыштың әртүрлі үдеуіне әкеледі, бұл кранның

механизмдері мен металл конструкцияларында қосымша динамикалық жүктемелерді тудырады, сайып келгенде, өнімділіктің төмендеуіне және кран элементтерінің мерзімінен бұрын істен шығуына әкеледі.

Пайдаланылған крандарда бірнеше рет жүргізілген өлшеу нәтижелері айналмалы тізбектердің кедергісінің ауытқуы өте маңызды екенін көрсетті. Орташа алғанда, қарама-қарсы тіректердің қозғалтқыштарының эквивалентті кедергісі арасындағы қатынас 1,4...1,6, кейбір крандарда 2,0...2,2 құрайды. Қарама-қарсы тіректердің қозғалтқыштарының Роторлық тізбектерінің кедергісін жүктеу кезінде айырмашылық дәрежесін азайту үшін кедергісі 2,5 Омға дейінгі қосымша ажыратылмайтын резисторлар қолданылады. Оларды қолданған кезде айналмалы тізбектерге қосылған басқару аппараттарының байланыс күйін жиі тексеру қажет. Бұл жағдайда қосымша резисторлардың болуы қосымша шығындардың пайда болуына әкеледі.

Сонымен қатар, әрбір тежеу процесінен кейін қозғалтқыштардың консистенциясы бұзылады және қозғалтқыштарды іске қосу кезінде олардың роторлары шамамен 180° сәйкес келмеген кезде қатты дүмпулер пайда болады.

Қарама-қарсы тіректердің доңғалақтарының диаметріндегі ауытқулар, іс жүзінде 2...3 мм-ге жетеді, қозғалтқыштар арасындағы жүктеменің таралуына аздап әсер етеді.

Кран механизмдерінде релелік-контакторлық жүйемен қатар дроссель жүйесі қолданылады. Бұл реттелмейтін тіректі кранның электр жетегінде оңтайлы. Іске қосу және тежеу режимдерінде асинхронды қозғалтқыш роторының тогын шектеу үшін іске қосу дросселін пайдалану синхронды 0,5-0,6 жылдамдыққа дейінгі моменттің шамамен тұрақтылығын сақтай отырып, электр қозғалтқыш роторын басқару жүйесі болмаған кезде механизмдердің іске қосылуы мен тежелуінің тегістігін қамтамасыз етеді.

Бұл жүйені қолдану барлық белсенді кедергілерді, релелік-контакторлық басқару тізбегін және жабдықты ротор тізбегіне қосу үшін кабель өнімдерін жояды, бұл механизмнің электр жетегінің тізбегін барынша жеңілдетеді.

Механизмдердің бірқалыпты үдеуін қамтамасыз ету есебінен, әсіресе, қарқынды тежеу, механикалық түйіндердің (редукторлар, муфтастар, біліктер, беткейлер және т.б.) қызмет ету мерзімі күрт артады. Кран машинисінің "озбырлығы" толығымен алынып тасталады, өйткені жөндеу кезінде таңдалған механизмдердің үдеуі мен тежелу қарқындылығы өзгеріссіз қалады. Бірақ әлі күнге дейін фазалық роторы бар асинхронды қозғалтқышты қолдану қазіргі кезде маңызды емес, бұл қымбатшылыққа байланысты [3].

Жоғарыда айтылғандардың негізінде динамикалық жүктемелерді және механизмнің тұрақтылығын төмендету үшін қолданыстағы басқару жүйелерін жаңарту немесе жаңа жүйелерді дамыту арқылы тіректі кранның қозғалыс механизмдерінің электр жетектерін реттеудің оңтайлы жүйесі қажет. Нәтижесінде, оған қойылатын барлық талаптарды ескере отырып, кран механизмдерінің беріктігі мен дәлдігі артуы керек.

Садовский и. М., Унгу Ф., Иордан г., Быстрова А. М., Иог В. И., Закорюкина Ю. В., Разумов В. А., Тищенко В. Н., Глазунов в. ф. және басқа

ғалымдардың еңбектерінде теориялар мен енгізу мәселелері әзірленді; әртүрлі өнеркәсіптік машиналар мен механизмдерде айнымалы токтың реттелетін көп қозғалтқышты электр жетегін қолдану қажеттілігі дәлелденді, оларды іске асыру жолдары мен әдістері анықталды [4].

Қазіргі уақытта релелік-контакторлық, дроссельдік жүйелері бар тіректі крандарының реттелмейтін электр жетектерінен реттелетін және сенімділігі тиімді электр жетектеріне ауысудың тұрақты тенденциясы бар. Бұл кран механизмдерінде асинхронды қысқа тұйықталған электр қозғалтқыштары бар жиілік түрлендіргіштерін белсенді қолдануға байланысты.

Жиілікті реттеу-асинхронды қозғалтқыштардың жақсы механикалық сипаттамаларын алуға мүмкіндік беретін айнымалы ток қозғалтқышының жылдамдығын реттеудің ең тиімді әдісі.

Электр жетектерін әзірлеу және зерттеу мәселелеріне м. п. Костенко, А. А. Булгаков, А. С. Сандлер, Ю. М. Гусяцкий, М. З. Хамудханов, А. Я. Бернштейн, Р. С. Сарбатов, И. Я. Браславский, Э. И. Ишматов, Р. Т. Шрейнер, В. Н. Поляков және т. б. ғалымдардың еңбектері арналған [4].

Бұл реттелетін электр жетегі жүйесінің негізгі артықшылықтары:

- реттеу тегістігі және механикалық сипаттамалардың жоғары қаттылығы, бұл жылдамдықты кең диапазонда реттеуге мүмкіндік береді;

- қозғалтқыштың абсолютті сырғудың төмен мәндерімен жұмыс істейтіндігімен және қозғалтқыштағы шығындар номиналдыдан аспайтындығымен анықталатын реттеудің тиімділігі.

Тіректі крандарында жиілікті-реттелетін электр жетектерін қолдана отырып, "жиілік түрлендіргіші – қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқыш" жүйесі бойынша жартылай өткізгіш түрлендіргіштердің көмегімен қозғалтқыштардың айналу жылдамдығын реттеу кезінде тіректі кранының қозғалу механизмінің автоматтандырылған электр жетегіне қатысты екі қозғалтқышты электр жетегінің математикалық модельдері әзірленбеген (ӨЖ-АҚ), жиілікті-реттелетін электр жетегінің басқару тәсілінің тиімділігіне талдау жүргізілген жоқ [5].

Жұмыстың мақсаты. Тіректі кранның қозғалыс механизмдерінің тіректерінің қозғалысын үйлестіру және екі қозғалтқышты электр жетегі үшін арнайы жасалған басқару жүйесін қолдана отырып динамикалық жүктемелерді азайту.

Жұмыстың идеясы. Жылдамдықты түрлендіргіштермен және кері байланыс арқылы жылдамдық сенсорларымен оңтайлы екі қозғалтқышты басқару жүйесін жобалау және зерттеу, бұл кран тіректерінің біркелкі қозғалысы жүзеге асырылатын келісілген айналуды қамтамасыз етеді; жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегі үшін оңтайлы басқару заңын таңдау.

Жұмыстың міндеттері:

- Тіректі кранының қозғалысы кезінде динамикалық жүктемелердің пайда болу себептерін талдау;

-қысқа тұйықталған роторы бар жиіліктік-реттелетін асинхрондық қозғалтқыштар базасында келісілген айнарудың екіқозғалтқыш жүйесінің математикалық моделін құрастыру;

-әр түрлі динамикалық жүктемелердің әсері және олардың әр электр жетегіне біркелкі бөлінбеуі кезінде екі қозғалтқыш жүйесін тұрақтылыққа зерттеу;

-Тіректі кранның қозғалыс механизмінің бір жүрісті доңғалағының бірқозғалтқыш қозғалыс жүйесі үшін басқарудың оңтайлы тәсілін зерттеу.

Ғылыми жаңалығы:

- жиілік түрлендіргіштері мен қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқыштың тіректі кранның қозғалу механизмі үшін келісілген айнарудың екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің математикалық моделін құрастыру.

- әр түрлі динамикалық жүктемелер кезінде тіректі кранның қозғалыс механизмдерінің келісілген айналуының екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегін басқару жүйесін дамыту.

Алынған нәтижелердің негізділігі мен дұрыстығы динамикалық процестерді математикалық сипаттау кезінде жалпы қабылданған жорамалдардың қолданылуымен; жаратылыстану ғылымдарының іргелі заңдарынан және Электржетек теориясынан туындайтын бастапқы посылкалардың негізділігімен; бүкіл әлемде салыстырмалы түрде жоғары дәлдікпен танылған MATLAB бағдарламасында имитациялық моделдеу әдістерінің қолданылуымен расталады.

1 Тіректі крандардың қозғалу механизмдерінің электр жетектерін пайдаланудың қазіргі жағдайы

1.1 Тіректі крандарының кинематикалық ерекшеліктері

Қазіргі уақытта тіректі крандар халық шаруашылығының әртүрлі салаларында жүк тиеу және қойма жұмыстарын механикаландырудың негізгі құралдарының бірі болып табылады. Тіректі крандар электр жетектерінің қысқа мерзімді және қайта-қысқа мерзімді режимдерімен сипатталатын жүк көтергіш және көлік машиналарының тобына кіретін көпір типіндегі крандарға жатады.

Мақсаты бойынша тіректі крандар үш негізгі топқа бөлінеді: жалпы мақсаттағы (қайта тиеу), құрылыс-монтаж және арнайы мақсаттағы. Жалпы мақсаттағы тіректі крандар (ТК) жер үсті рельсті және рельссіз көлік құралдары қызмет көрсететін ашық қоймаларда және тиеу алаңдарында пайдаланылады; олардың жүк көтергіштігі әдетте 3,2...50 т. Аралықтары 10...40 м, көлік құралдарын тиеу-түсіру немесе жүктерді қатарлау жағдайларына байланысты көтеру биіктігі 7..16 м.

Тіректі крандардың барлық топтарының ішінде жалпы мақсаттағы ТК кең таралған. Олар құрылымы жағынан қарапайым және металды аз тұтынады, ал егер оларды көпірлі крандармен салыстыратын болсақ, онда нақты шығындар бойынша олар тіпті шамалы үлкен.

Тіректі крандар әртүрлі құрылымдық схемалар бойынша жасалады, оларға байланысты басқа түйіндер мен механизмдер орындалады.

1.1-суретте екі тіректі ешкі кранының көрнекі көрінісі көрсетілген. Тіректер көпірге қатты қосылған. Тартпалардың екі түрі бар: біреуі қатты, ал екіншісі-икемді. Электр білігі көпірге орнатылады, ол көтеру-түсіру және жүк түсіру функциясын орындайды. У тіреуіштері негіздері белгіленеді жүрістік арба жүре алатын рельспен. Жүретін арбалардың қозғалысы көп қозғалтқышты электр жетегі саласында ерекше қызығушылық тудыратын қозғалыс механизмдеріне ықпал етеді келісілген немесе синхронды айналу. Бұл технологиялық талаптан тұрады: кранның өзі жүкпен қозғалғанда доңғалақтардың рельстер бойымен бірдей қозғалысы жағдайында. Ол үшін осы талапты қамтамасыз ететін электр жетектерін басқарудың арнайы жүйесі қажет.



Сурет 1.1 - Екітіректі тіректі кранның көрнекі көрінісі

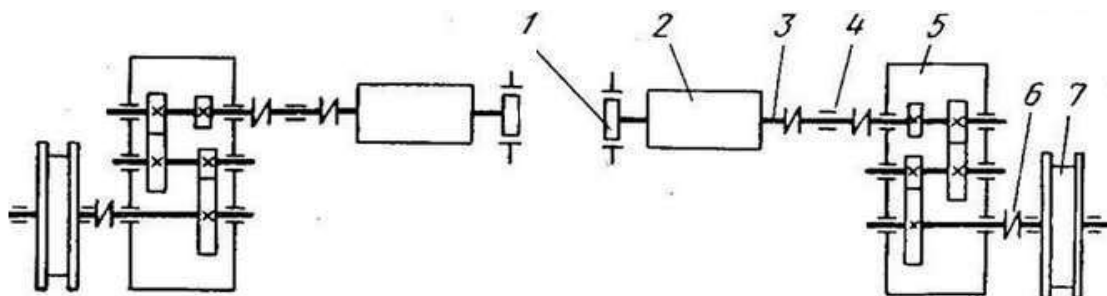
Тіректі крандарда әртүрлі механикалық операцияларды орындау қажеттілігіне байланысты әртүрлі типтегі электр жетектері қолданылады. Олар негізінен жүкті көтеру, арбаның қозғалысы (көпірде), тіректі кранның қозғалыс механизмдеріне арналған электр жетектеріне жіктеледі.

Жалпы мақсаттағы ТК қозғалыс механизмдерін негізінен көп қозғалтқышты етіп орындайды, онда әр электр жетегі бөлек басқарылады. Электр жетектерінің ара қатынасы жүріс дөңгелектерінің 50% кем болмауы тиіс. Электр жетектерін басқарудағы айырмашылыққа қарамастан, олардың арасында сыртқы үйлестіру жүйесі арқылы жүзеге асырылатын байланыс бар. Нәтижесінде кранды рельстер бойымен жылжыту функциясы қамтамасыз етіледі.

Құрылымдық жағынан, қозғалыс механизмдері тіректермен бекітілген бір доңғалақты немесе тепе-теңдік арбалары түрінде және көбінесе екі тірек жұп болып тірелетін жүгіру арқалықтары түрінде жүзеге асырылады. 1.2-суретте тіректі кранын жылжытудың екі келісілген механизмі бар. Әрбір механизм электр қозғалтқышынан, редукторынан 5, мойынтіректерде айналатын біліктен 3, жетек доңғалақтарынан 7, муфтадан 6 және тежегіштен 1 тұрады.

Қозғалыс механизмдерінде электр жетектері ретінде тұрақты және айнымалы ток электр қозғалтқыштары қолданылады. Алайда, электр

жетектерінің дамуына байланысты тұрақты ток қозғалтқыштарын қолдану бұрынғы нәрсе болып қала берді. Қазіргі уақытта фазалық және қысқа тұйықталған роторлары бар асинхронды электр қозғалтқыштары кең таралған. Сонымен қатар, екіншісі жүк көтергіштігі 5 тоннадан аз (ал электр қуаты 30 кВт-қа дейін) ТК-да қолданылады, ал басқалары барлық басқа жағдайларда қолданылады [3].



Сурет 1.2 - Қозғалыс механизмдерінің екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің кинематикалық сұлбасы

Қолданылатын электр қозғалтқыштары цикл ұзақтығы 10 минуттан аспайтын кезде (ПВ) 15, 25, 40 және 60% қосу ұзақтығымен сипатталатын қайта - қысқа мерзімді режимде жұмыс істеу үшін есептеледі. Айнымалы токтың кран қозғалтқыштарының негізгі номиналды режимі ПВ=40% болып табылады. Осылайша, электр жетектерінің түрлерін таңдау механизмдердің жұмыс режимдеріне, сондай-ақ жүк көтергіштігінің параметрлік талаптарына ықпал етеді [22].

1.2 Тіректі крандардың қозғалу механизмдерінің жұмыс режимдері

Қазіргі уақытта ГОСТ 25835-83 сәйкес ТК механизмдерінің жұмыс режимдерінің алты тобы қарастырылған, олардың әрқайсысы пайдалану және жүктеу класстарына белгілі бір үйлесімімен сипатталады. Пайдалану класстары механизмнің жұмыс уақытының нормасына байланысты белгіленеді. Барлық осы классификациялар тіректі кран механизмдерінің барлық түрлеріне, соның ішінде қозғалыс механизмдеріне де стандартты. ТК қозғалыс механизмдерінің мысалында 1.1 және 1.2 кестелерде ұсынылған пайдалану және жүктеу класстарының болжамды сипаттамалары қарастырылады [22].

Көлденең қозғалыс механизмдерінің электр жетегі жүктемелердің барлық диапазонында қатаң сипаттамаларға ие. Жоғары жылдамдықтардан төмен жылдамдықтарға тежеу үшін электр жетегі тежеу сәтін шектей отырып, қозғалтқыштан тежеу режиміне автоматты ауысуды қамтамасыз етуі тиіс.

1.1-кесте - ТК қозғалу механизмдерін пайдаланудың класстары

Қолдану класстары	Уақытта бойынша қолданысы
-------------------	---------------------------

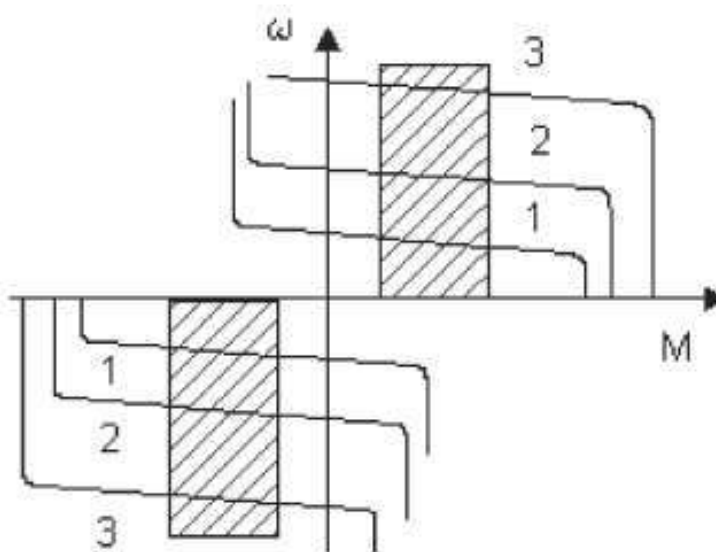
A0	Сирек
A1	Тұрақсыз
A2	Төмен қарқындылықты тұрақты
A3	Орташа қарқындылықты тұрақты
A4	Тұрақты емес қарқындылықты
A5	Үш ауысымды жұмыс кезінде қарқынды
A6	Үш ауысымдық жұмыс кезінде өте қарқынды

1.2-кесте - ТК қозғалу механизмдерін жүктеудің бағдарлы класстары

Жүктелу классы	Қолданыстағы жүктемелердің сипаттамасы
	Қозғалыс механизмі
B1	Сирек іске қосу және тежеу, едәуір жұмыс және бос жүріс; жүктердің аз массасы; жұмыс қарқындылығы аз және қызмет көрсетудің үлкен алаңдары бар өндірістер
B2	Сирек, бірақ тұрақты іске қосу және тежеу; шағын жұмыс және бос жүріс; жүктердің аз массасы; тұрақты, бірақ шектеулі жұмыс қарқындылығы және қызмет көрсету алаңдары бар өндіріс
B3	Тұрақты іске қосу және тежеу; шағын жұмыс және бос жүріс; салыстырмалы түрде үлкен жүк массасы; жұмыс қарқындылығы жоғары және қызмет көрсету алаңдары шағын өндіріс
B4	Тұрақты режимге өте сирек шығатын жиі іске қосу және тежеу; жүктердің үлкен массасы; жұмыс қарқындылығы жоғары және қызмет көрсету алаңдары шектеулі өндіріс

1.3 Қозғалыс механизмдерінің электр жетектеріне қойылатын талаптар

Қозғалыс механизмдерінің электр жетектері қозғалыс бағытына тәуелсіз реактивті жүктеме моментінің болуымен ерекшеленеді. Қозғалыс механизмінің мінсіз электр жетегі қозғалтқыш және тежегіш режимдерінде 1.3-суретке сәйкес қатты механикалық сипаттамаларды қамтамасыз етуі керек. Көтеру механизмінен айырмашылығы, қозғалыс механизмдерінің тежегіш режимі циклдің аз ғана уақытын алады және, әдетте, жоғары жылдамдықтан төменгі жылдамдыққа ауысқан кезде пайда болады.



Сурет 1.3 - КК қозғалыс механизмінің электр жетегінің қажетті механикалық сипаттамалары

Тежеу кезіндегі негізгі талап-технологиялық талаптарға байланысты ТК-ны дәл тоқтату.

Монтаждау жұмыстарын жүзеге асыратын ТК қозғалыс механизмдерін тоқтатудың қажетті дәлдігі әртүрлі болуы мүмкін. Ең жоғары талап етілетін дәлдік-5-10 мм. Мұндай тоқтау дәлдігі төмен жылдамдықпен қамтамасыз етілуі мүмкін-шамамен 0,4-0,6 м/мин. номиналды сызықтық қозғалыс жылдамдығы 30-40 м / мин, қажетті реттеу диапазоны 60:1-70:1 тым үлкен. Сонымен қатар, төмен жылдамдыққа ауысқан кезде жүктің сөзсіз тербелуі жылдамдықты төмендету арқылы жүктің дәл жағдайына жетудің барлық әрекеттерін азайтады.

Сондықтан жүкті бекітудің үлкен дәлдігіне қол жеткізу үшін жылдамдықтың белгілі бір іс жүзінде қолайлы төмендеу мүмкіндігін (көбінесе - номиналды 15-20% дейін) және ең бастысы – іске қосу мен тежелудің жоғары тегістігін қамтамасыз ету керек.

Бұл жағдайда сіз "аяқтау" кезінде жетекті қысқа мерзімді қосу арқылы шағын қозғалыстарды ала аласыз. Тежеу режимінде қозғалыс механизмдерінің

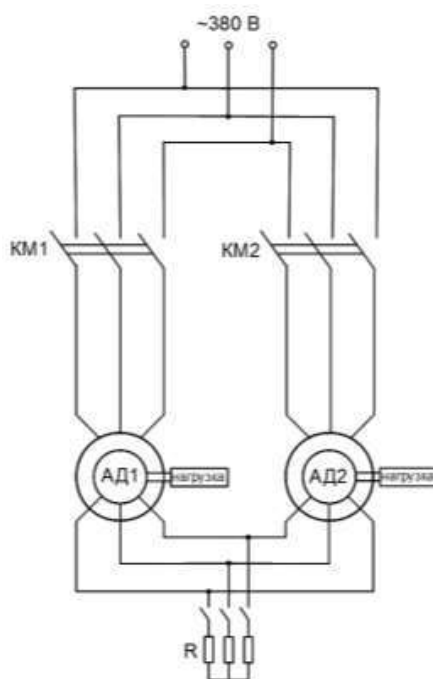
электр жетегі көлбеу қозғалыс кезінде де жұмыс істей алады (рельс жолдары дұрыс жұмыс істемегенде болады) немесе желмен қозғалу кезінде.

Қозғалыс механизмдерінде үлкен инерция моменті бар, сондықтан тіректі кранның металл конструкциялары мен механизмдеріне динамикалық жүктемелердің жоғарылауына жол бермеу үшін электр жетегі іске қосу және тежеу кезінде үдеуді шектеуі керек. Инерцияның үлкен сәтіне байланысты мұндай механизмдердің электр қозғалтқыштары жоғары іске қосу шығындарын ескере отырып таңдалады, осыған байланысты электр қозғалтқыштарының білігіндегі статикалық момент, әдетте, номиналды моменттің 50% аспайды. Тасымалданатын жүктің массасы, әдетте, қозғалыс механизмінің электр жетегінің статикалық моментіне аз әсер етеді, өйткені тіректі кранның металл құрылымының массасы әдетте жүктің массасынан үлкен болады. Сонымен, жүк көтергіш крандардың жүк арбасының салмағы жүк көтергіштігіне байланысты номиналды жүктің 30-55% аралығында болады. Бұл дегеніміз, жүксіз жұмыс істеу кезінде механизмнің статикалық моменті (механизмнің төмендетілген тиімділігін ескере отырып) номиналды жүкті жылжыту кезіндегі моменттің 20-30% құрайды. Қозғалыс механизмдері үшін статикалық моменттердің өзгеру диапазоны әлдеқайда аз, өйткені көпірдің жүк көтергіштігі мен ұзындығына байланысты тіректі кранның салмағы Q_n -ден 1,2-6 есе ($Q_n < 50$ т) асады; $Q_n > 75$ т бар крандар үшін қозғалатын бөліктердің салмағы (0,75-1,5) Q_n құрайды. Сондықтан қалыпты аралық ұзындығы ($L \approx 20$ м) және $Q_n > 75$ т болатын крандардың қозғалыс механизмдерінің статикалық моменті шамамен 2 есе өзгереді, ал $Q_n < 50$ т жүксіз жұмыс істейтін крандарда ол номиналды жүкті жылжытқан кездегі сәттің 60-75% құрайды [3].

ТК қозғалыс механизмдерінің электр жетектеріндегі тежегішті басқару алгоритмі көтеру механизмдерінің электр жетектеріне қарағанда қарапайым. Реактивті жүктеме моментіне байланысты тежегішті алып тастау көп жағдайда электр қозғалтқышының моменті статикалық момент мәніне дейін көтерілгенше күтпестен жасалуы мүмкін. Негізгі талап - динамикалық жүктемелерді азайту және тежегіш төсемдердің тозуын азайту үшін нөлге жақын жылдамдықта тежегіш төсеу. Алайда, ашық аспан астындағы крандардың жұмысы желге ұшырайды, бұл үлкен желкенділік жағдайында статикалық кедергі моментінің өзгеру шектерінің едәуір кеңеюіне әкелуі мүмкін, ал момент белгісі де өзгеруі мүмкін. Бұдан шығатыны, электр қозғалтқышы тұрақты режимде әрдайым қозғалтқыш пен тежегіш режимінде жұмыс істейді. Берілген номиналды жағдайда механизмнің жылдамдығын реттеу диапазоны талап етілетін төмен жылдамдықпен анықталады. Тоқтату алдында механизм аударылатын төмен жылдамдықтың болуы оператордың жұмысын жеңілдетеді, басқарудың ыңғайлылығын тудырады және тоқтаудың дәлдігін арттырады.

1.4 Электр жетектерін басқарудың қолданыстағы жүйелеріне шолу

Дәстүр бойынша, фазалық роторы бар асинхронды қозғалтқыштар кран электр жетектерінде негізгі қолдануды табады. Мұндай қозғалтқыштары бар электр жетектеріндегі жылдамдық пен моментті реттеу ротор тізбегіне іске қосуды реттейтін реостаттарды қосу арқылы жүргізіледі. Бұл әдіс негізінен магниттік стартерлерге немесе қуат контроллерлеріне негізделген релелік контакторлы басқару жүйелерінде қолданылады және бүгінгі күні тиімсіз болып саналады. Осы жүйелердегі роторлардың айналу жылдамдығын үйлестірудің ең типтік тәсілі - "электрлік жұмыс білігін" (ЭЖБ) пайдалану және 1.4-суретте көрсетілген жылдамдықты реттеудің реостаттық әдісі үшін жалпы Роторлық қарсылықты енгізу. Қозғалтқыштардың айналу жылдамдығының жалпы Роторлық қарсыласу мәнінің жоғарылауымен ол номиналдыға жақын, бірақ сонымен бірге жүйенің айналу үйлесімділігін қолдайтын моменттердің мәні азаяды, соның салдарынан "ЭЖБ" жүйесі кейбір маңызды кемшіліктерге ие, мысалы, төмен сіңіру қабілеті, тербелістерге бейімділік және төмен энергия көрсеткіштері.

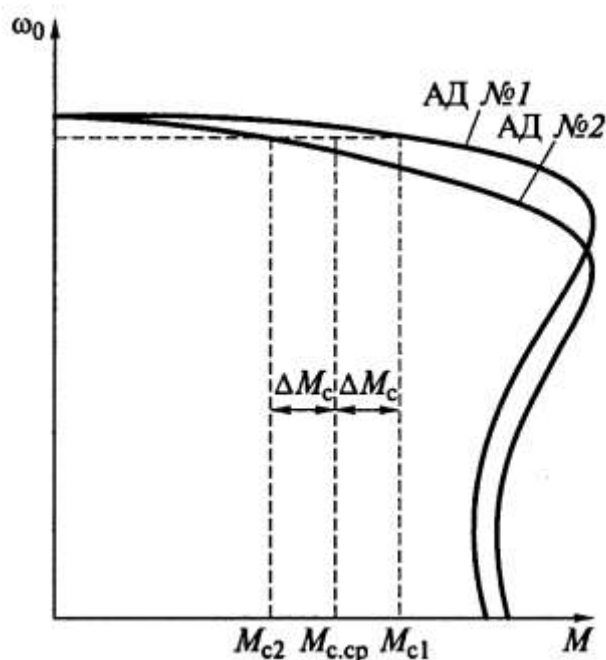


1.4-сурет - Электр жұмыс білігі бар ТК-ның қозғалу механизмдерінің екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегі

Бұл қозғалыс механизмдерінің электр қозғалтқыштары арасында аралықтың болуы магниттік стартерлердің (KM1 және KM2) тұйықталуының теңсіздігін және сымның ұзындығындағы айырмашылықпен байланысты роторлық қарсылықтар мәндерінің айырмашылығын тудырады. Орташа алғанда, қарама-қарсы тіректердің қозғалтқыштарының эквивалентті кедергісі арасындағы қатынас 1,4...1,6, ал кейбір жағдайларда 2,0 2,2 құрайды.

Қарсылықтардың айырмашылығына байланысты әртүрлі слайдтар пайда болады, нәтижесінде 1.5-суретке сәйкес электр қозғалтқыштарының әртүрлі жүктемелері пайда болады., қозғалыс механизмдерінің екі кинематикалық байланысқан электр қозғалтқыштары арасындағы бірдей емес механикалық сипаттамаларды анықтайды.

Реостатты басқарудың маңызды кемшілігі-реттеу сипаттамаларының жоғары беріктігіне байланысты төмен жүктеме сәттерінде (аз жүктің қозғалысы кезінде) тұрақты төмен жылдамдықты алу мүмкін еместігі. Алайда, осыған қарамастан, жүйені іске асыру оңай және талаптарға қатысты сенімділік дәрежесі бар.



1.5-сурет - ТК қозғалыс механизмдерінің екі электр қозғалтқышы арасында жүктеменің біркелкі бөлінбеуі

Басқару жүйелерінде фазалық роторы бар асинхронды қозғалтқыштардың КК қозғалыс механизмдерін қолданумен қатар, қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқыштар да қолданылады. Статистикалық мәліметтер бойынша іске қосу-реттеу кедергісі бар фазалық роторы бар қозғалтқыштарды пайдалану қысқа тәуліктік роторға қарағанда 5 есе жоғары. Бұл қозғалтқыштардың жылдамдығын кең ауқымда түбегейлі реттеу екі жолмен жүзеге асырылады: жиілік түрлендіргіштерінен және полюстер жұптарының санын өзгерту. Ең үнемді және сенімді әдіс - жиілікті. Басқарудың бұл әдісі тиристорлық түрлендіргіштердің көмегімен жүзеге асырылады. Алайда, осы құрылғылардың көмегімен реттеу кезінде номиналды жылдамдықтан жоғары жылдамдықты алу мүмкін емес.

КК қозғалыс механизмдерінің көп қозғалтқышты электр жетектерін басқарудың кеңінен қолданылатын жүйелері туралы деректер 1.3-кестеде келтірілген [23].

Кесте 1.3 - Асинхронды электр жетегін басқару жүйесінің көрсеткіштері

Басқару жүйесінің көрсеткіштері			
Электр жетегінің жүйесі	Магниттік қосқыш		Қуат контроллері
Реттеу және басқару әдісі	Желіге тікелей қосу		Статор тізбегіндегі реостат
Реттеу мүмкіндігі:			
I-III квадрант	-		+
II-IV квадрант	-		+
Реттеу Диапазоны			1:3-тен 1:6-ға дейін
Азаю жағына қарай	-		-
Арттыру жағына қарай	-		-
Іске қосу моменті	-		-
Электр жетегінің жүйесі	Күштік контроллер	Тиристорлық реттеуші	Тиристорлық жиілік түрлендіргіші
Реттеу және басқару әдісі	Ротор тізбегіндегі Реостат	Статор тізбегіндегі кернеудің өзгеруі	Жиілікті реттеу
Реттеу мүмкіндігі:			
I-III квадрант	+	+	+
II-IV квадрант	-	+	+
Реттеу Диапазоны			
Азаю жағына қарай	1:3	1:10	1:40
Арттыру жағына қарай	-	-	-
Іске қосу моменті	1:4	1:4	-

1.3-кестеге сәйкес реттеудегі ең үлкен мүмкіндіктерге жиілікті реттеу арқылы қол жеткізуге болатындығын көруге болады.

Қазіргі уақытта жиілік түрлендіргіштерінен қуат алған кезде қысқа тұйықталған роторы бар қуаты 55 кВт дейінгі асинхронды қозғалтқыштарды пайдалануда оң тәжірибе бар. Мұндай техникалық шешім фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыш негізінде дәстүрлі кран электр жетегі жүйелерімен жабдықталған крандарды жаңарту кезінде қабылданды.

Бұл жағдайда электр қозғалтқыштары ең үнемді нұсқа болып табылатын 1.6-суреттегі бір жиілік түрлендіргішінен де, кран механизмдерін икемді басқаруды қамтамасыз ететін жеке түрлендіргіштерден де қоректенуі мүмкін. Шағын аралықтары бар жалпы мақсаттағы көпір икозлалық крандардың көп қозғалтқышты жетектерінде қозғалтқыштар тобын қуаттандыру үшін бір түрлендіргіш жеткілікті деп болжауға болады. Бұл жағдайда әрбір қозғалтқыш жылу релесі түрінде жеке жүктемеден қорғаумен жабдықталуы тиіс [12].

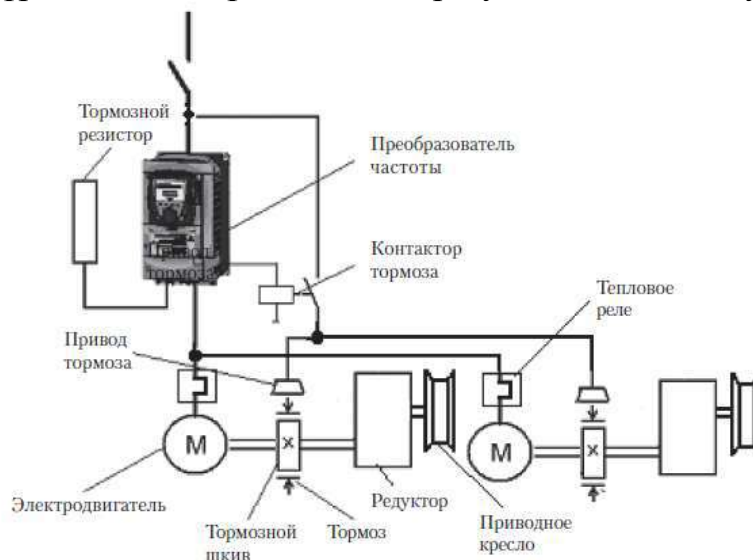


Рис.3.4. Структурная схема электропривода механизма передвижения

Сурет 1.6 - Қозғалыс механизмінің электржетегінің құрылымдық схемасы

Жеке түрлендіргіштерден қозғалтқыштарды қоректендіру үлкен аралықтары бар ТК қозғалыс механизмдерінің жетектері үшін орынды болып көрінеді. Бұл жағдайда басқарудың үлкен икемділігіне байланысты қозғалтқыштар арасындағы жүктемені "жүргізуші-жүруші" схемасы бойынша теңестіруді, кран көпірінің қисаюын жою үшін жетектердің қозғалысын үйлестіруді және т. б. қамтамасыз етуге болады.

"Жүргізуші-жүруші" схемасы бойынша жиілік түрлендіргіштерін қолданудың артықшылықтарына қарамастан, олардың кемшіліктері әлі де бар, атап айтқанда, Берілгендерге сәйкес қозғалыс механизмдеріндегі қозғалтқыштардың жылдамдығын сақтауда. Бұл бірінші жетекші

қозғалтқыштағы жүктеме өзгерген кезде, айналу жылдамдығы төмендеген кезде, екінші тізбекте автоматты түрде төмендейді. Нәтижесінде тіректі кранның қозғалу жылдамдығы төмендейді, ал кейбір жағдайларда аялдамалар болады. Осының негізінде басқарудың арнайы заңдарын қолдану үлкен маңызға ие.

1.5 Тіректі кранның қозғалыс механизмінің әртүрлі қозғалыстарындағы көлбеу күштердің пайда болу себептері

Көпір түріндегі көптеген крандарда көлденең қозғалыс динамикасы көпір мен крандарда көпірдің болуына байланысты ұқсас. Алайда, крандарда құрылымдық және жұмыс жүктемелерінен басқа, екі бағытта қарсылық моментінің оң белгісі бар жел жүктемесі де ескеріледі. Осыған сүйене отырып, осы бөлімде қарсыласу сәттерін қарастыру шартты түрде желкенді және жел жүктемесін қамтиды, ал динамика әдебиет тізімінде А.Дорофеевтің диссертациясынан алынған [6].

Жалпы мақсаттағы Кранның металл құрылымы - бұл дөңгелек және соңғы арқалықтардан тұратын жалпақ тікбұрышты жақтау, ал соңғысы жұмыс доңғалақтарына негізделген консольдер құра отырып, тіктөртбұрыштан асып түседі. Нақты жұмыс жағдайында кран көпірі көлденең жазықтықта екі рет сыртқы және үш рет ішкі статикалық түрде анықталмайды, оның механизмдері тұтастай алғанда тұрақты, айналмалы және қозғалмалы элементтері бар күрделі жүйені білдіреді. Жалпы жағдайда, 1.7-суретке сәйкес, Кранның қозғалыс механизмі екі (жүк көтергіштігі төрт немесе одан да көп крандарда) бірдей жетектерді қамтиды, олардың негізгі элементтері электр қозғалтқышы 1, редуктор 2 аралық білік 3, муфталар 4, тежегіш 5, қорғасын 6 және жетек 7 дөңгелектер, (үлкен жүк көтергіштігі бар крандар үшін кран доңғалақтарының саны он алтыға жетеді) пролетацех бағандарына орнатылған рельстерде қозғалады.

Кранның доңғалақтары мен кран астындағы рельстердің арасында міндетті жобалық саңылаулар бар, олар $a = 15 + 40$ мм. нәтижесінде тіректі кранның пайдалы қозғалысы кран жолдарының бағыты бойынша екі қосымша қозғалыспен жүреді: көпірдің рельстерге көлденең жылжуы және кранның ауырлық центрінен өтетін тік осьтің айналуы. Ең алдымен, көлденең ығысулар көлденең жазықтықта кранға әсер ететін күштердің асимметриялық бөлінуінен туындайды, бұл оның тіректерінің синхронды емес қозғалысына және кранның металл құрылымында серпімді деформация күштерінің (көлбеу күштердің) пайда болуына әкеледі, олар тіректердің қозғалыс жылдамдығындағы айырмашылықты өтуге тырысады. Серпімді деформация күштері қозғалыс кезінде де, тоқтағаннан кейін де өз салмағынан және жүктің салмағынан жүктемелермен бір уақытта кранға жүктеледі.

Кран элементтеріндегі кернеулердің салыстырмалы мәні мұндай күштерден 30% жетеді, ал жеке элементтер үшін олар 100% анықтайтын жүктеме болып табылады.

Металл құрылымындағы деформацияның серпімді күштерінің өзгеруінің мөлшері мен сипаты бірқатар себептермен анықталады, олардың негізгілері:

- Кранның қозғалыс қозғалтқыштарының әртүрлі сипаттамалары;
- жүк тиелген арбаның Кранның ортасынан жылжуы, сонымен қатар көлбеу күшінің мөлшері мен сипатына жүктің суспензиясының ұзындығы мен сипаты (икемді немесе қатты) және жүктің бастапқы күйі (тербелістердің амплитудасы мен жазықтығы) әсер етеді, бұл кран тіректерінің қозғалысының әртүрлі кедергісіне әкеледі;

- кранды пайдалану процесінде шамамен 0,5 –1,5 мм жететін Кранның жетекші доңғалақтарының диаметріндегі айырмашылық;

- рельс жолына қатысты қисаю бұрышы бар кран дөңгелектерін орнату;

- жетекші доңғалақтардың рельстермен ілінісуінің бұзылуы;

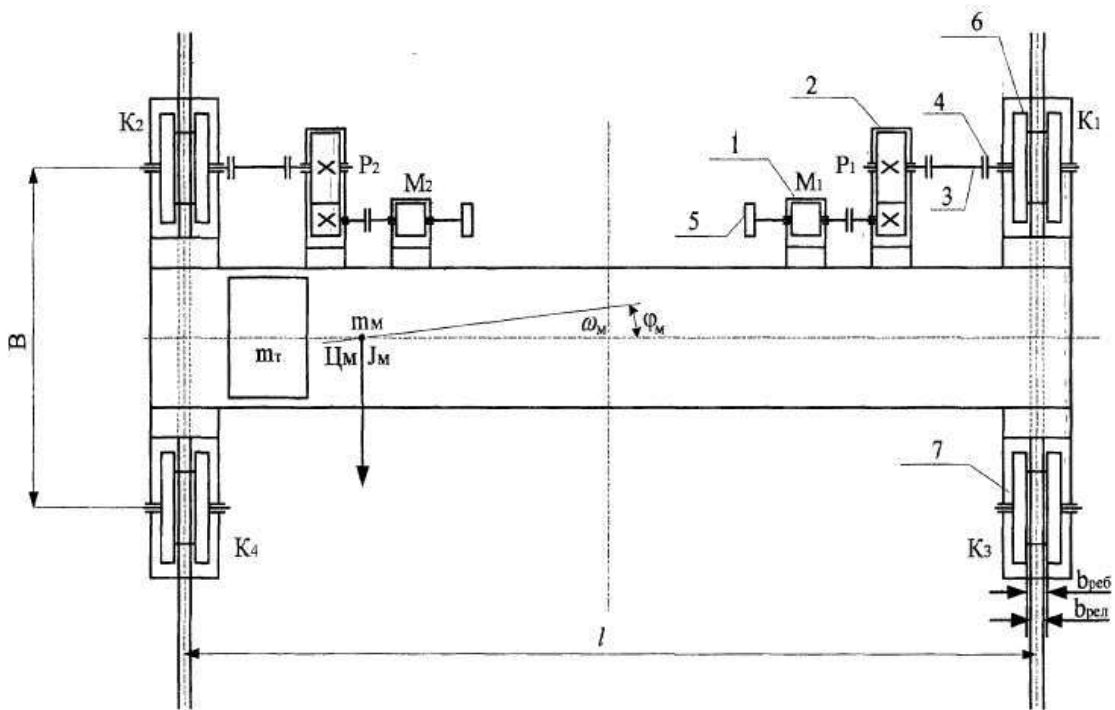
- трансмиссия элементтеріндегі Саңылау;

- жел жүктемесі;

- механизмдердің жұмыс қозғалыстарын біріктіру: кранды жылжыту және жүкті көтеру механизмі; кранды жылжыту және арбаны жылжыту механизмі және т. б.

Осы себептерге байланысты кран тіректерінің қозғалысы синхронды емес, бұл кранның металл конструкцияларында бұрмалану күшінің пайда болуына әкеледі. Көлбеу күші ешкі крандарының жұмысына теріс әсер ететіндіктен, бұл күштерді анықтау, олардың мөлшеріне әртүрлі факторлардың әсерін бағалау, сондай-ақ көлбеу күштердің мөлшерін азайту әдістерін жасау үлкен мәнге ие болды.

1.7-суретке сәйкес, біз бұл мәселені толығырақ қарастырамыз. Жүк тиелген арба, мысалы, сол жақ кран тіректерінің біріне ауысады делік. Содан кейін тік жүктемелердің жоғарылауына байланысты кранның сол жағының қозғалысына қарсылық артады, ал оң жағы төмендейді. Сонымен қатар, осыған байланысты көпір фермасының қисаю күші пайда болады. Көпірдің көлденең жылжуы мен бұрылуы өте баяу болғандықтан, алғашқы жақындауда көлбеу күштің себептерін талдау үшін оларды ескермеуге болады, өйткені доңғалақтар мен рельстердің түйісу нүктесінде осы қозғалыстарды болдырмайтын идеалды көлденең байланыстар қолданылады.



Сурет 1.7 - Тіректі қранның қозғалыс механизмі бар көпірдің кинематикалық схемасы

Осы жағдайларға сүйене отырып, тіректі қранның еркін қозғалысы кезеңінде, яғни оның доңғалақтарының ешқайсысы рельстерге тимеген кезде, Қранның қозғалыс механизмін өзара серпімді механикалық байланысы бар екі электр қозғалтқышы бар электромеханикалық жүйе (ЭМЖ) түрінде ұсынуға болады. Көпір фермасына қатысты электр қозғалтқыштары параллель қосылғандықтан, мұндай жүйені 1.8 суретте көрсетілген параллель ЭМЖ-ға жатқызуға болады [6]. Параллель ЭМЖ түрінде ұсынылған аспалы жүктемесі бар ешкі қранның қозғалысын сипаттайтын дифференциалдық теңдеулер жүйесі келесі түрге ие:

$$\begin{cases} M_{D1} - M_S - M_{C1} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{D2} + i \cdot M_S - M_{C2} - M_G = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_G = J_3 \frac{d\omega_3}{dt}; \\ M_S = C_S \cdot (\varphi_1 - i \cdot \varphi_2); \\ M_G = C_G \cdot (\varphi_2 - i \cdot \varphi_3); \end{cases} \quad (1.1)$$

мұндағы $M_{Di} = \square_1(\square_0 \square \square l)$ - Электр қозғалтқыштарының жетек моменттері;

\square_1, \square_2 - 1-ші және 2-ші электр қозғалтқыштарының механикалық сипаттамаларының қаттылығы;

M_S - кранның қисаюынан келтірілген серпімді момент;

M_G - тасымалданатын жүк тудыратын келтірілген момент;

M_{C1}, M_{C2} - қарсылықтың берілген моменттері;

C_G - тростың серпімділік коэффициенті;

C_S - көпір фермасының серпімділік коэффициенті;

J_1 - көпірдің бірінші жартысы мен бірінші қозғалтқыштың жалпы инерция моменті;

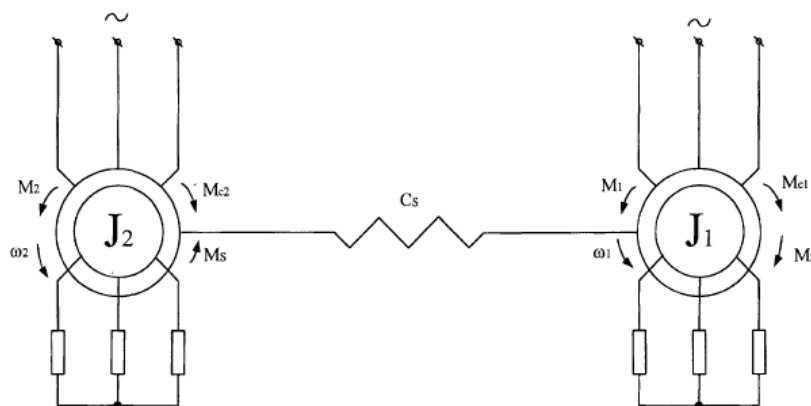
J_2 - көпірдің екінші жартысы мен екінші қозғалтқыштың инерциясының жалпы моменті;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - келтірілген бұрыштық жылдамдықтар және кран мен жүк тіректерінің орын ауыстырулары;

$i = \omega_1 / \omega_2 = D_2 / D_1$ - коэффициент приведения;

D_1, D_2 - тіректі кранның жетекші жетек доңғалақтарының диаметрлері.

(1.1) теңдеу жүйесімен сипатталған параллель ЭМК көмегімен кейбір жағдайлар үшін көлбеу күштердің пайда болуын зерттеу жүргізілді. Козловка краны іске қосылды делік, онда қозғалыс механизмінің электр қозғалтқыштары әртүрлі механикалық сипаттамаларға ие. Жүксіз арба көпірдің ортасында, ал жетек дөңгелектерінің диаметрлері тең делік. Ол үшін теңдеулер жүйесінде (1.1) жүктің инерция моментін нөлге ($J_3 = 0$) теңестіру керек және M_G серпімді өзара әрекеттесу моментін алып тастау керек.



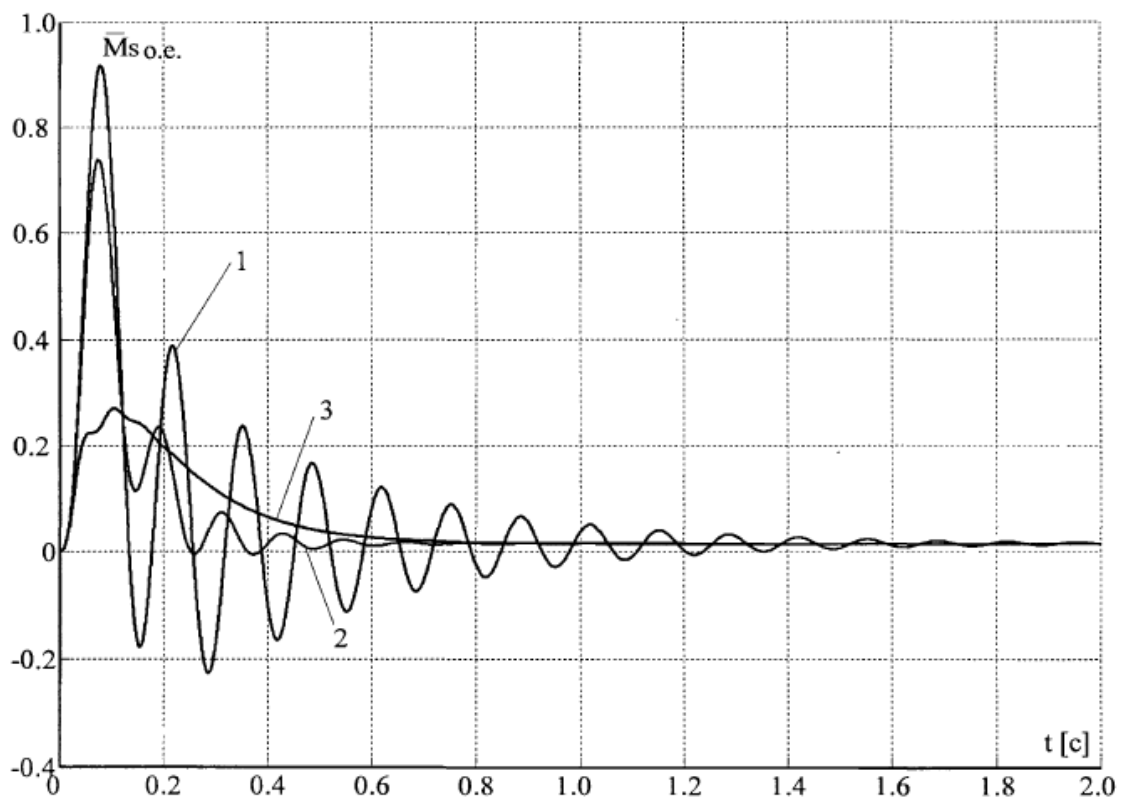
Сурет 1.8 - Екі массалы параллель ЭМК

Арбаның бұл орналасуымен тіректі кранның әр тірегінің қозғалысына қарсылық бірдей болады. Бірақ электр қозғалтқыштары әртүрлі механикалық сипаттамаларға ие болғандықтан, бірдей жүктеме кезінде олар әртүрлі бұрыштық жылдамдықпен айналады. Осы қашықтықтың нәтижесінде кран тіректерінің әрқайсысы өрнектен анықталады:

$$S_I = \int \omega_i \cdot \frac{1}{\omega_i} dt \quad (1.2)$$

Олар әртүрлі болады ($S_1 \neq S_2$), және бұл 1.3-суретке сәйкес, тіректі кранның көлбеу күшінің пайда болуына әкеледі. Мұнда және одан әрі суреттерде көлбеу күштің мәні салыстырмалы бірліктерде ұсынылады. Салыстырмалы бірліктерге көшу кезінде электр қозғалтқышының номиналды моменті ($M_b = M_n$) базалық мән ретінде қабылданды.

Іске қосу кезіндегі қисаю күшінің ең үлкен мәніне 1.9-суретте көрсетілген, 1-қисық кран тіректерінің қозғалтқыштарының айналуының ең үлкен сәйкес келмеуі кезінде қол жеткізіледі. Кранның тұрақты қозғалыс жылдамдығымен көлбеу күші салыстырмалы түрде аз және іс жүзінде тұрақты болып қалады.



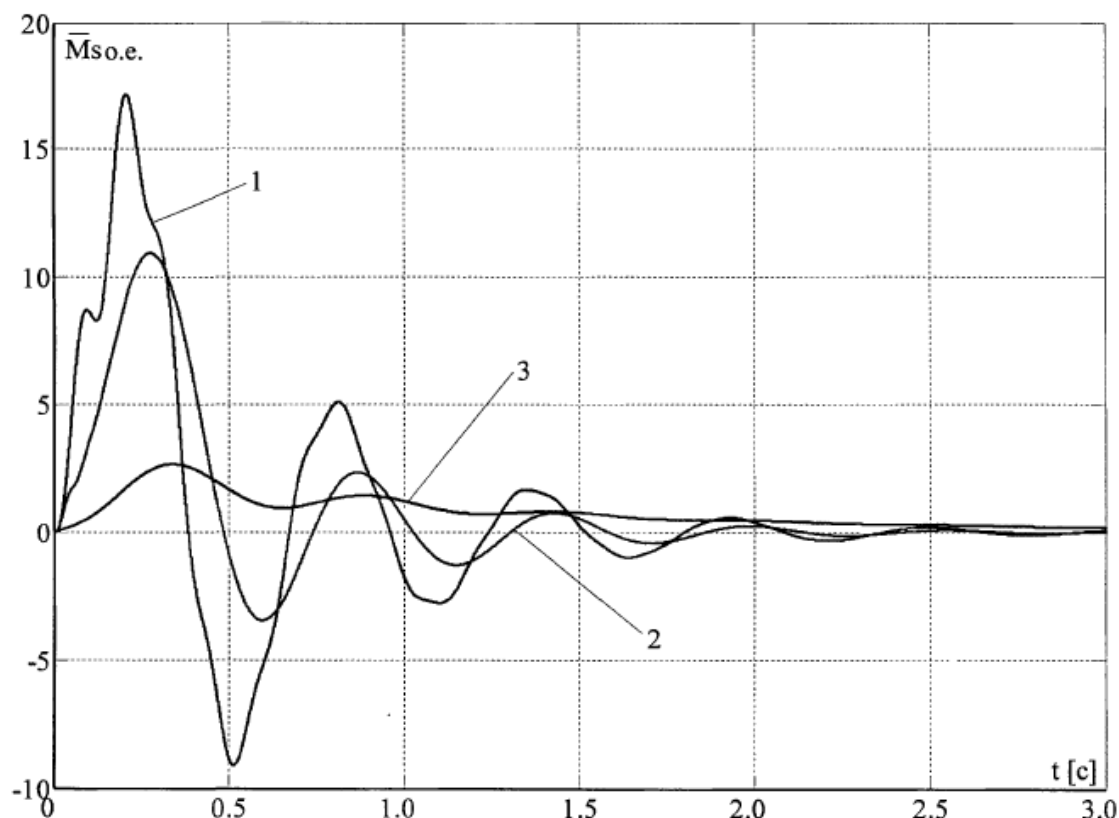
1.9 сурет - Электр қозғалтқыштарының механикалық сипаттамаларының әртүрлі қаттылықтары бар жүйені іске қосу кезінде тіректі кранының металл конструкциясына әсер ететін қисаю күштері:
1-синхрондау коэффициенті $q = 0$; 2- $q = 1$; 3- $q = 10$

Бұл кранның металл құрылымында пайда болатын серпімді күштер үлкен жолдан өткен тіректің қозғалыс жетегіне қосымша жүктеме жасайтындығына байланысты. Осы жүктемеге байланысты қозғалтқыштың айналу жылдамдығы басқа қозғалтқыштың жылдамдығына тең болғанша азаяды. Осы сәттен бастап кран тіректері бірдей жылдамдықпен қозғалады, бірақ тұрақты жұмыс істейтін көлбеу күшпен. (1.2) өрнегінен жетекші доңғалақтардың диаметрлері тең

болған жағдайда, кран тіректерінің әрқайсысынан өткен қашықтық жетек қозғалтқыштарының бұрыштық жылдамдықтарының теңдігі сақталған жағдайда ғана тең болады.

Егер электр жетектері жүйесінде электр қозғалтқыштарының айналу жылдамдығының айырмашылығы бойынша кері байланыс қолданылса, бұрыштық жылдамдықтардың теңдігін сақтауға болады. Бұрыштық жылдамдықтар айырмасы бойынша тұйықталған жүйенің математикалық сипаттамасы (1.1) өрнектен өзгеше болады, өйткені өрнектің бірінші теңдеуіне (1.1) " $q \cdot (\omega_2 - \omega_1)$ " термині, ал жүйенің екінші теңдеуіне (1.1) " $q \cdot (\omega_1 - \omega_2)$ " термині енгізіледі. Синхрондау коэффициенті q - кері байланыс күшін сипаттайтын нақты сан. 1.9-суретте көрсетілген 2 және 3 қисықтар жылдамдық айырмасы бойынша кері байланыс әрекеті кезінде қисаю күшінің өзгеруін көрсетеді. Бұл тәуелділіктер жылдамдық айырмашылығы бойынша теріс кері байланыс $\Delta\omega$ өтпелі процестердің апериодтық сипатын алуға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Сонымен қатар, Q синхрондау коэффициенті неғұрлым үлкен болса, Кранның қисығы соғұрлым аз болады.

Енді жүк арбасы тіректердің біріне жылжытылған Кранның іске қосу процесі қарастырылуда. Бұл жағдайда Кранның қозғалыс механизмінің электр қозғалтқыштарына жүктеме бірдей болмайды. Ал үлкен жүктемесі бар қозғалтқыш аз жылдамдықпен айналады, бұл өз кезегінде кран тіректерінің қозғалысы тағы да әртүрлі болады. Модельдеу нәтижелері, жүк арбасын жылжыту кезіндегі көлбеу күштер 1.10-суретте, 1-қисықта көрсетілген.

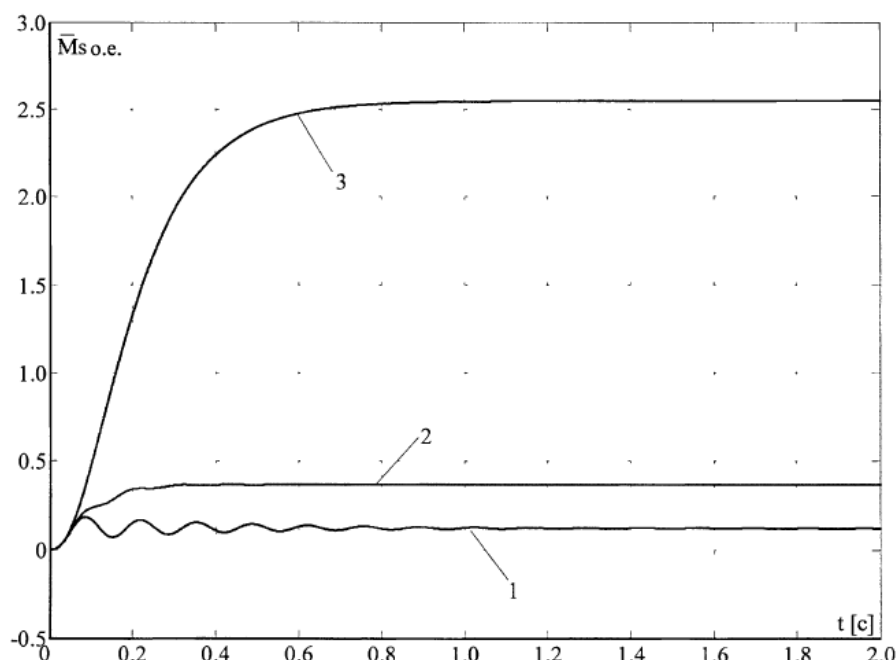


1.10 сурет - Тіректі қранының тіректерінің бірінде жүгі бар жүйені іске қосу кезінде Козловка қранының металл конструкциясына әсер ететін қисаю күштері 1-синхрондау коэффициенті $q = 0$; 2- $q = 10$; 3- $q=100$

Сипаттамалардың бұл түрі екі тербеліс жиілігінің, қран металл конструкциясының жоғары табиғи тербелістерінің және икемді суспензиядағы жүктің төмен тербелістерінің әсерінен алынады.

1.10-суретте көрсетілген 2,3 қисықтар жылдамдық айырмашылығы бойынша кері байланыс әрекеті кезінде пероксид күшінің өзгеруін көрсетеді.

Көлбеу күштің пайда болуының негізгі себептерінің бірі-үнемі жұмыс істейтін соққы жүктемелеріне байланысты жұмыс кезінде пайда болатын Қранның жетекші доңғалақтарының диаметріндегі айырмашылық. Бұл жағдайда қранды іске қосу процесі 1.11-суретте көрсетілген.

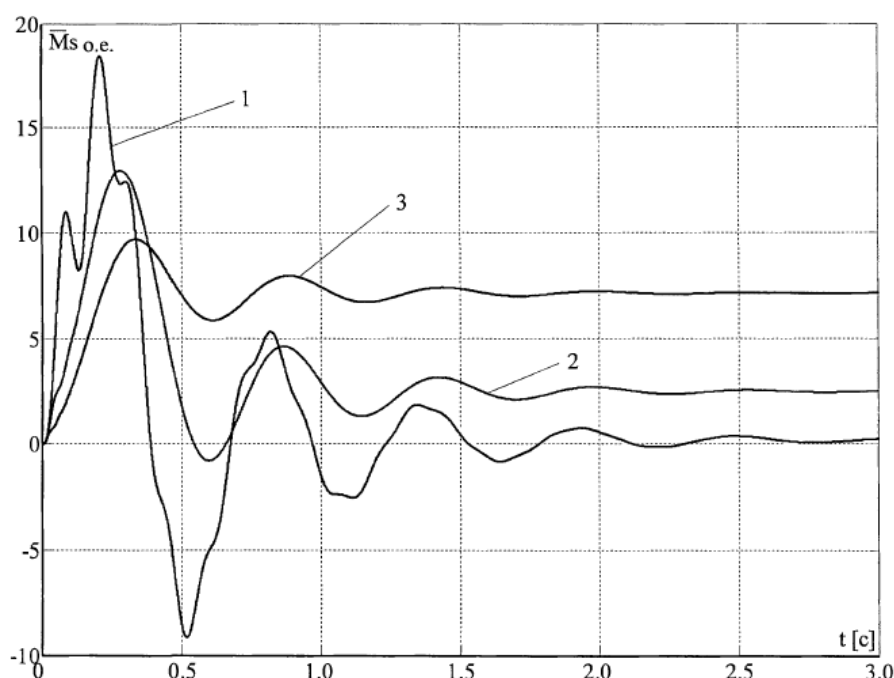


1.11 сурет - Жетек доңғалақтарының әртүрлі диаметрлі жүйесін іске қосу кезінде тіректі қранының металл конструкциясына әсер ететін қисаю күштері 1-синхрондау коэффициенті $q = 0$; 2- $q = 1$; 3- $q = 10$

Жүксіз арба көпірдің ортасында, ал қран тіректерінің қозғалтқыштары бірдей механикалық сипаттамаларға ие делік. Қранның жетекші доңғалақтарының диаметрлерінің айырмашылығымен әр тіректен өткен қашықтық әр түрлі болатыны анық, сондықтан бұл қранның көлбеу күшінің пайда болуына әкеледі (1.11-сурет, 1-қисық). Теріс кері байланысты енгізу, 1.11-суреттегі 2,3 қисықтары көрсеткендей, жүйеде ауытқуларды азайтады, бірақ сонымен бірге көлбеу күштің жоғарылауына ықпал етеді, ал синхрондау

коэффициенті неғұрлым үлкен болса, көлбеу күш соғұрлым көп болады. Бұл бұрыштық жылдамдықтардың теңдігін сақтауға ұмтылған кезде (1.2) өрнегімен анықталатын жүріп өткен қашықтықтардағы айырмашылық $\frac{1}{2} \cdot (D_1 - D_2) \cdot t = k \cdot t$ -ға артады, яғни көлбеу күші Электр қозғалтқыштарының синхронды айналуы бұзылғанға дейін ешкі кранының қозғалыс уақытына тура пропорционал өседі.

1.6-суретте жоғарыда қарастырылған барлық себептер біріктірілген кезде көлбеу күштердің өзгеруінің өтпелі кезеңдері көрсетілген. Бұл суреттен Кранның қозғалысын бастау үшін өтпелі процестің бастапқы сәтінде жылдамдық айырмашылығы бойынша кері байланыс енгізу Кранның металл құрылымына әсер ететін динамикалық жүктемелердің деңгейін төмендететінін көруге болады.



1.12 сурет - Барлық теріс факторлар үйлескен кезде тіректі кранының металл конструкциясына әсер ететін қисаю күштері; 1-синхрондау коэффициенті $q = 0$; 2- $q = 10$; 3- $q = 100$;

Қарастырылған жағдайлардың кез-келгенінде көлбеу күштердің мөлшерін тек кран тіректерімен өтетін қашықтықтардың теңдігін сақтаған кезде азайтуға болады ($S_1 = S_2$), яғни көпірдің әр тірегімен өтетін жолды бақылау керек және көпір тіректерінің өту қашықтықтарының айырмашылығы мүмкіндігінше аз болатындай етіп электр жетегін басқару жүйесіне (ЭЖ) тиісті сигналдар беру керек [6].

Кранның динамикасын әмбебап зерттеу үшін, еркін қозғалыс кезінде де, доңғалақтардың ребордтарының кран жолының рельстерімен байланысы

кезінде де, ең аз синхрондау коэффициенттерімен екі қозғалтқышты электр жетегінің айналу үйлесімділігін қолдайтын математикалық модель жасау қажет.

1.6 Міндеттер қою

Жоғарыда айтылғандардың негізінде диссертациялық жұмыста екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегі тіректі кранның қозғалыс механизмдерінің келісілген айналуын қарастырады. Бұл көп қозғалтқышты электр жетектерін басқару жеке жиілік түрлендіргіштерінен жүзеге асырылады. Ешкі крандарының қозғалыс механизмдеріне қойылатын талаптар мен ерекшеліктерді ескере отырып, электр жетектерінің жылдамдықтарының толық үйлесімділігіне қол жеткізу және жүктемелердің біркелкі бөлінбеуіне және жел әсеріне байланысты кез-келген динамикалық әсерлерге үдеу, тежеу және тұрақтылықтың оңтайлы өлшемдерін қамтамасыз ету қажет:

- MATLAB бағдарламасында қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды электр қозғалтқыштарының жұмыс істеу тұрақтылығын талдау және параметрлерін есептеу;

- жиілік түрлендіргіштері бар тұйық бір қозғалтқышты басқару жүйесінің математикалық сипаттамасы;

- жиілік түрлендіргіштерімен жабық бір қозғалтқышты басқару жүйесінің тұрақтылық жағдайынан кері байланыс коэффициентін есептеу;

- жиілік түрлендіргіштерімен келісілген айнарудың екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің сызықты сызбасын жасау;

- жылдамдықтың сәйкес келмеуі бойынша кері байланыстың жалпы коэффициентімен келісілген екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің математикалық сипаттамасы;

- жүктемелердің біркелкі бөлінбеуіне байланысты әртүрлі динамикалық режимдерді белгілеу кезінде тұрақтылыққа келісілген айнарудың екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегін зерттеу;

- қысқа тұйықталған роторы бар жиілікті-реттелетін синхронды электр жетектеріндегі басқарудың қолайлы әдісін зерттеу;

- қозғалыс механизмдеріндегі моментті тікелей басқару жүйелерін талдау.

2 MATLAB ортасында қысқа тұйықталған роторлы асинхронды электр қозғалтқышын модельдеу

2.1 Жалпыланған асинхронды машинаның математикалық сипаттамасы

Асинхронды қозғалтқыштың статор мен роторда үш фазалы орамасы бар екендігі белгілі, сондықтан математикалық сипаттамада жалпыланған асинхронды машина (лар) ұғымы қолданылады. Барлық орамалар симметриялы үш фазалы кернеу көзінен қоректенеді. Математикалық аппаратты пайдалану кезінде Электротехниканың классикалық заңдары қолданылады. Мысалы, статор мен ротор орамаларындағы ЭМӨ тепе-теңдік теңдеулері Кирхгофтың екінші заңына негізделген.

Статор үшін:

$$\begin{cases} u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{cases} \quad (2.1)$$

Ротор үшін:

$$\begin{cases} u_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ u_b = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ u_c = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \end{cases} \quad (2.2)$$

(2.1) және (2.2) теңдеулерінде статор мен ротордың кернеулерінің, токтарының және ағындарының лездік мәндері олардың белсенді кедергісін ескере отырып болады. Статор мен ротордың барлық орамалары симметриялы болғандықтан, олардың қарсыласу мәндері бірдей болады және келесідей жазылады: $R_A=R_B=R_C=R_s$ (статор орамасының белсенді кедергісі) және $R_a=R_b=R_c=R_R$ (ротор орамасының белсенді кедергісі).

Ток орамаларын кесіп өтетін ағындарды байланыстыру үшін екінші Ампер заңы қолданылады.

Осылайша, статор ағыны келесі түрде жазылады:

$$\begin{cases} \Psi_A = L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{Aa}i_a + L_{Ab}i_b + L_{Ac}i_c; \\ \Psi_B = L_{BA}i_A + L_{BB}i_B + L_{BC}i_C + L_{Ba}i_a + L_{Bb}i_b + L_{Bc}i_c; \\ \Psi_C = L_{CA}i_A + L_{CB}i_B + L_{CC}i_C + L_{Ca}i_a + L_{Cb}i_b + L_{Cc}i_c. \end{cases} \quad (2.3)$$

Ротор ағыны:

$$\begin{cases} \Psi_a = L_{aA}i_A + L_{aB}i_B + L_{aC}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c; \\ \Psi_b = L_{bA}i_A + L_{bB}i_B + L_{bC}i_C + L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c; \\ \Psi_c = L_{cA}i_A + L_{cB}i_B + L_{cC}i_C + L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c. \end{cases} \quad (2.4)$$

Жоғарыда келтірілген теңдеулер жүйесіне сәйкес, әр орамалар симметриялы және өзара индукциялық процестерді ескере отырып, олар арқылы өтетін токтардың мәніне байланысты. Сондықтан теңдеулерден (2.3) және (2.4):

- $L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$ - әр ораманың өзіндік индуктивтілігі;
- қалғандары-тиісті орамалар арасындағы өзара индукция.

Талдаудың негізін құрайтын үшінші заң-Ньютонның екінші заңы, ол қозғалтқыштың электромагниттік моментінің тепе-теңдігін және механизмге қолданылатын қарсылық моментін ескереді:

$$J \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_c, \quad (2.5)$$

мұнда J (кг·м²) - қозғалтқыштың өзі де, жұмыс механизмі мен редуктодың білігіне де инерцияны ескере отырып, қозғалтқыш білігіндегі инерция моменті;

ω_m (рад/с) - машина білігінің бұрыштық жылдамдығы;

M_c (Н·м) - қозғалтқыш білігіне келтірілген жұмыс механизмінің моменті.

Сонымен, машинаны талдауға негізделген төртінші және соңғы Заң - сол қолдың ережесі бойынша Ленц тұжырымдайтын заң. Бұл заң моменттің, ағынның және токтың векторлық шамаларын байланыстырады:

$$\vec{M} = k(\vec{\Psi} \cdot \vec{i}). \quad (2.6)$$

Қорытылған асинхронды машинаның теңдеулері соңғы түрінде [8,9,10]:

$$\begin{cases}
 \dot{i}_s = R_s \dot{i}_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_k \psi_s; \\
 \dot{i}_r = R_r \dot{i}_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \psi_r; \\
 \psi_s = L_s \dot{i}_s + L_{sr} \dot{i}_r; \\
 \psi_r = L_{sr} \dot{i}_s + L_r \dot{i}_r; \\
 M = \frac{3}{2} p \cdot k \cdot M \sin(\psi_r - \psi_s); \\
 J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c.
 \end{cases} \quad (2.7)$$

2.2 Қозғалмайтын координаттар жүйесіндегі асинхронды қозғалтқыштың құрылымдық моделі

Бекітілген күрделі координаттар жүйесінде ($\omega_k=0$) нақты ось \square арқылы, ал қиял \square арқылы белгіленеді. Бұл жағдайда кеңістіктік векторлар осьтер бойымен орналаса $\vec{u}_s = u_{s\alpha} + j u_{s\beta}; \vec{i}_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}; \vec{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j \psi_{r\beta}$

Осы мәндерді теңдеулерге (2.7) ауыстыру және нақты және қиял бөліктерін бөлек теңестіру арқылы біз аламыз:

$$\begin{cases}
 u_{s\alpha} = r i_{s\alpha} + L_s \frac{d i_{s\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}; \\
 u_{s\beta} = r i_{s\beta} + L_s \frac{d i_{s\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}; \\
 0 = -k_R R_r i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\alpha} + \frac{d \psi_{R\alpha}}{dt} - p \omega_m \psi_{R\beta}; \\
 0 = -k_R R_r i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\beta} + \frac{d \psi_{R\beta}}{dt} - p \omega_m \psi_{R\alpha}; \\
 M = \frac{3}{2} p \cdot k_R (\psi_{R\alpha} i_{s\beta} - \psi_{R\beta} i_{s\alpha}); \\
 J \frac{d \omega_m}{dt} = M - M_c,
 \end{cases} \quad (2.8)$$

мұнда $r = R_s + \frac{L_s}{T_R}$, $L_s = \frac{L_s}{T_R}$, $T_R = \frac{L_r}{k_R}$ - коэффициенттер.

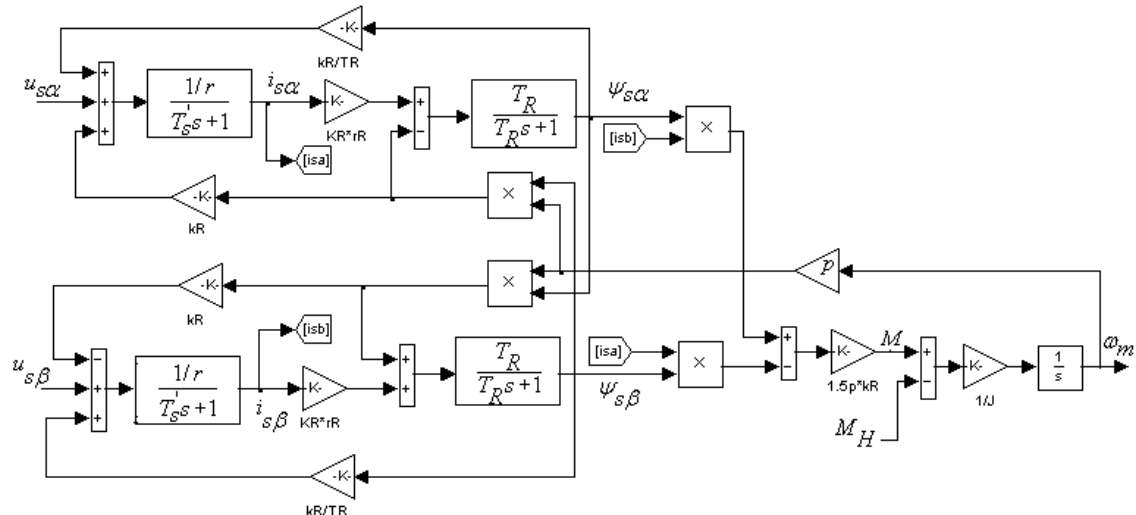
Теңдеулер жүйесі (2.8) оператор түрінде [8]

$$\begin{cases}
u_{S\alpha} = r(1 + T_S s) i_{S\beta} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}; \\
u_{S\beta} = r(1 + T_S s) i_{S\alpha} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}; \\
0 = -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} (1 + T_R s) \psi_{R\alpha} + p \omega_m \psi_{R\beta}; \\
0 = -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} (1 + T_R s) \psi_{R\beta} + p \omega_m \psi_{R\alpha}; \\
M = \frac{3}{2} p \cdot k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}); \\
J \omega_m s = M - M_C,
\end{cases}
\quad (2.9)$$

Математикалық модельді алу үшін теңдеулер жүйесінен (2.9) Токтар мен ағымдар пайда болады, нәтижесінде теңдеулер жүйесі пайда болады:

$$\begin{cases}
i_{S\alpha} = (u_{S\alpha} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} + k_R p \omega_m \psi_{R\beta}) \frac{1}{r(1 + T_S s)}; \\
i_{S\beta} = (u_{S\beta} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} - k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}) \frac{1}{r(1 + T_S s)}; \\
\psi_{R\alpha} = (k_R R_R i_{S\alpha} - p \omega_m \psi_{R\beta}) \frac{T_R}{(1 + T_R s)}; \\
\psi_{R\beta} = (k_R R_R i_{S\beta} - p \omega_m \psi_{R\alpha}) \frac{T_R}{(1 + T_R s)}; \\
M = \frac{3}{2} p \cdot k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}); \\
\omega_m = (M - M_C) \frac{1}{J_S}.
\end{cases}
\quad (2.10)$$

Теңдеулер жүйесіне (2.10) сәйкес 2.1-суретте көрсетілген қозғалмайтын координаттар жүйесінде АКЗ құрылымдық схемасы құрылады.



2.1 сурет - Қозғалмайтын координаттар жүйесіндегі АКЗ құрылымдық сұлбасы

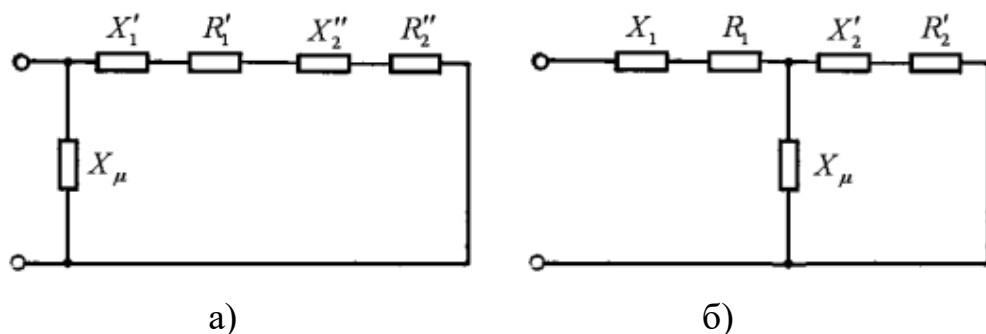
2.3 Асинхрондық қозғалтқыштың құрылымдық моделінің параметрлерін есептеу

4А сериялы қозғалтқыштың негізгі техникалық деректері 2.1-кестеде келтірілген [11].

2.1-кесте - 4А сериялы электр қозғалтқышының негізгі техникалық деректері

Электрқозғалтқыш түрі	P _н , кВт	КПД, %	р	cosφ _н	Салыстырмалы параметрлер				
					X _μ	l ₁	X _{1*}	R _{2*}	R _{2*}
4A132S4У3	7,5	87,5	2	0,86	3,0	0,048	0,085	0,033	0,13
Электрқозғалтқыш түрі	P _н , кВт		U ₁ ф,В		S _н , %		S _к , %		J, кг·м ²
4A132S4У3	7,5		220		2,9		19,5		0,028

2.2 - суретте Г-тәрізді және Т-тәрізді алмастыру схемалары көрсетілген.



2.2-сурет-А) Г-тәрізді алмастыру схемасы; б) Т-тәрізді алмастыру схемасы

АҚ-ның белгілі техникалық деректері мен Г-тәрізді алмастыру схемасының параметрлері бойынша қысқа тұйықталу режиміндегі Т-тәрізді алмастыру схемасының параметрлері (2.2 Б-сурет), теңдеулер жүйесінің коэффициенттері (2.10) және АҚ моделі блоктарының параметрлері есептеледі.

Толық есептеу 4А132S4У3 типті электр қозғалтқышы үшін жүргізілді, ал алынған электр қозғалтқышының есептік параметрлері 2.2 кестеде келтірілген [12].

Номиналды фазалық статор тогы:

$$I_{1H} = \frac{P_{2H} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1\Phi} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,16 \text{ А} \quad (2.11)$$

Кедергінің базистік мәні:

$$Z_B = \frac{U_{1\Phi}}{I_1} = \frac{220}{15,16} = 14,59 \text{ Ом} \quad (2.12)$$

Токтың бұрыштық жиілігі

$$\omega = 2\pi f_1 = 2314,5 \text{ рад/с} \quad (2.13)$$

Салыстырмалы бірліктердегі статор шашырауының реактивтік кедергісі:

$$X_{1*} = \frac{2X'_1 \cdot X_\mu}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4X'_1 \cdot X_\mu}} = \frac{2 \cdot 0,085 \cdot 3}{3 + \sqrt{3^2 + 4 \cdot 0,085 \cdot 3}} = 0,083 \text{ Ом} \quad (2.14)$$

Т - және Г-тәрізді алмастыру схемаларында машина параметрлерін байланыстыратын коэффициент:

$$n_1 = \frac{X'_1}{X_{1*}} = \frac{0,085}{0,083} = 1,024 \quad (2.15)$$

Статор фазасының реактивті шашырау кедергісі:

$$X_1 = \frac{X'_1 \cdot Z_b}{n_1} = \frac{0,085 \cdot 14,6}{1,024} = 1,212 \text{ Ом} \quad (2.16)$$

Статор фазасының белсенді кедергісі:

$$R_1 = R_s = \frac{R'_1 \cdot Z_b}{n_1} = \frac{0,048 \cdot 14,59}{1,024} = 0,684 \text{ Ом}$$

(2.17)

Статор фазасының шашырау индуктивтілігі:

$$L_{1s} = \frac{X_1}{\omega_1} = \frac{1,212}{314} = 0,0039 \text{ Гн} \quad (2.18)$$

Ротор фазасының реактивті шашырау кедергісі:

$$X_2' = \frac{X_2'' \cdot Z_b}{n_1^2} = \frac{0,033 \cdot 14,6}{1,024^2} = 1,81 \text{ Ом} \quad (2.19)$$

Ротор фазасының белсенді кедергісі:

$$R_2' = R_r = \frac{R_2'' \cdot Z_b}{n_1^2} = \frac{0,033 \cdot 14,6}{1,024^2} = 0,46 \text{ Ом} \quad (2.20)$$

Ротор фазасының шашырау индуктивтілігі:

$$L_{2s} = \frac{X_2'}{\omega_1} = \frac{1,81}{314} = 0,0058 \text{ Гн} \quad (2.21)$$

Өзара индукцияның реактивтік кедергісі:

$$X_\mu = X_{1\mu} \cdot Z_b = 314,6 \cdot 0,15 = 47,19 \text{ Ом} \quad (2.22)$$

Өзара индуктивтіліктің индуктивтілігі:

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{1,5 \cdot \omega_1} = \frac{47,19}{1,5 \cdot 314} = 0,099 \text{ Гн} \quad (2.23)$$

Статор фазасының толық индуктивтілігі:

$$L_s = L_\mu + L_{1s} = 0,099 + 0,0039 = 0,1029 \text{ Гн} \quad (2.24)$$

Ротор фазасының толық индуктивтілігі:

$$\boxed{} \text{ Гн} \quad (2.25)$$

Қозғалтқыштағы қуаттың жалпы шығындары:

$$\Delta P_\Sigma = \frac{P_{2H}}{\eta_H} - P_{2H} = \frac{7500}{0,875} - 7500 = 1071,43 \text{ Вт} \quad (2.26)$$

Статор орамасындағы электр шығындары:

$$\Delta P_{\Sigma 1} = m_1^2 R_s = 3 \cdot 15^2 \cdot 0,08 = 104,3 \text{ Вт} \quad (2.27)$$

Магниттелетін ток:

$$I_\mu = \frac{U_{1\Phi}}{X_1 + X_\mu} = \frac{220}{1,212 + 47,19} = 4,88 \text{ А} \quad (2.28)$$

Статор болатындағы жоғалту:

$$\Delta P_{\Sigma 2} = m_1^2 r_m Z_b = 3 \cdot 15^2 \cdot 0,15 = 104,3 \text{ Вт} \quad (2.29)$$

мұндағы r_m - 0,08-0,2 диапазонынан таңдалады.

Паспорттық деректерге сәйкес номиналды сырғу $S_H = 2,9\%$, салыстырмалы бірліктерде $S_H = 0,029$.

Ротор орамасындағы негізгі шығындар:

$$\Delta P_{\Sigma 2} = S_H \cdot \left(\frac{P_{2H}}{\eta_H} - \Delta P_{\Sigma 2} - \Delta P_{\Sigma 1} \right) = 0,029 \cdot \left(\frac{7500}{0,875} - 1071,43 - 104,3 \right) = 232 \text{ Вт} \quad (2.30)$$

Болаттағы және механикалық суммалық шығындар:

$$P_{\text{мех}} = 157 \text{ Вт} \quad (2.31)$$

Механикалық шығындар:

$$P_{\text{мех}} = 157 \text{ Вт} \quad (2.32)$$

Мінсіз қозғалтқыш жылдамдығы:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ с}^{-1} \quad (2.33)$$

Қозғалтқыштың номиналды жылдамдығы:

$$\omega_0 = 157 \text{ с}^{-1} \quad (2.34)$$

Тұтқыр үйкеліс коэффициенті:

$$B_m = \frac{\Delta P_{MX}}{\omega_H^2} = \frac{267,26}{152,45^2} = 0,011 \quad (2.35)$$

Электрқозғалтқыштың түрі	I_H , А	Z_6 , Ом	ω_0 , с^{-1}	X_{I^*} , Ом	c_1	X_I , Ом	R_I , Ом	L_{1S} , 10^{-3} Гн	X'_2 , Ом
4A132S4Y3	15,1	14,6	157	0,083	1,024	1,212	0,684	3,9	1,81
	R'_2 , Ом	L_{2S} , 10^{-3} Гн	X_μ , Ом	L_μ , 10^{-3} Гн	L_S , 10^{-3} Гн	L_R , 10^{-3} Гн	ω_0 , с^{-1}	Вт, Н·м·с	
	0,46	5,8	43,8	0,093	0,096	0,098	152,45	0,011	

Құрылымдық модельге кіретін коэффициенттерді есептеу:

$$r = R_1 + \frac{L_\mu^2}{L_R} \cdot R'_2 = 0,684 + \frac{0,093^2}{0,098^2} \cdot 0,46 = 1,1$$

$$L'_S = L_S - \frac{L_\mu^2}{L_R} = 0,096 - \frac{0,093^2}{0,098} = 0,008$$

$$T'_S = \frac{L'_S}{r} = \frac{0,008}{1,1} = 0,0072 \quad (2.36)$$

$$r = 1,1$$

$$L'_S = 0,008$$

Құрылымдық модельдің коэффициенттері 1.3-кестеде келтірілген.

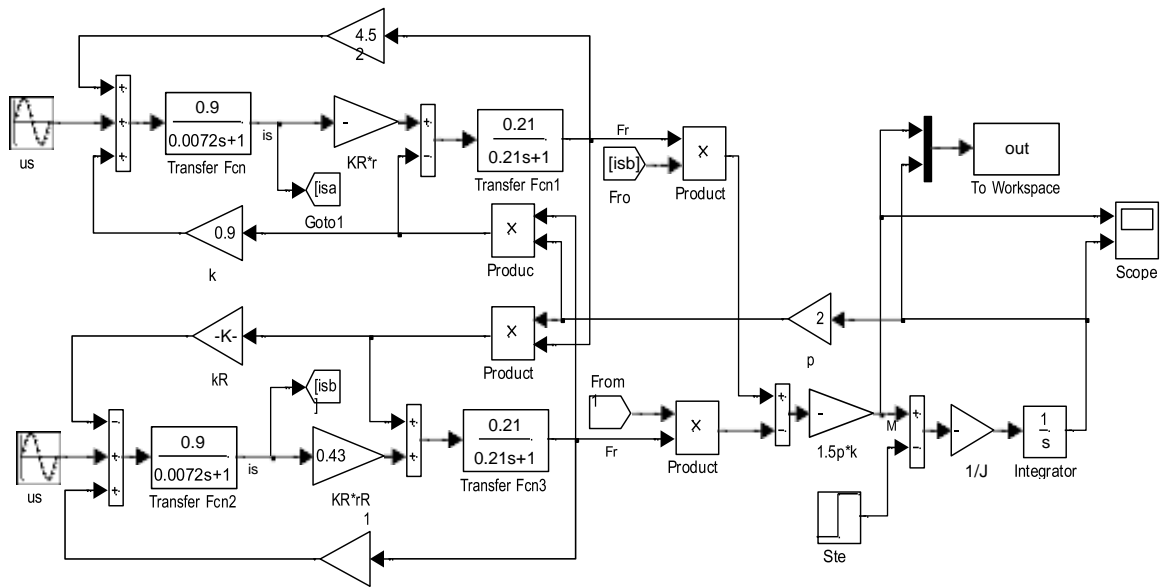
Кесте 1.3-құрылымдық модель параметрлері

Электрқозғалтқыш түрі	r	L'_S	T'_S	T_R	k_R

4A132S4Y3	1,1	0,008	0,0072	0,21	0,95
-----------	-----	-------	--------	------	------

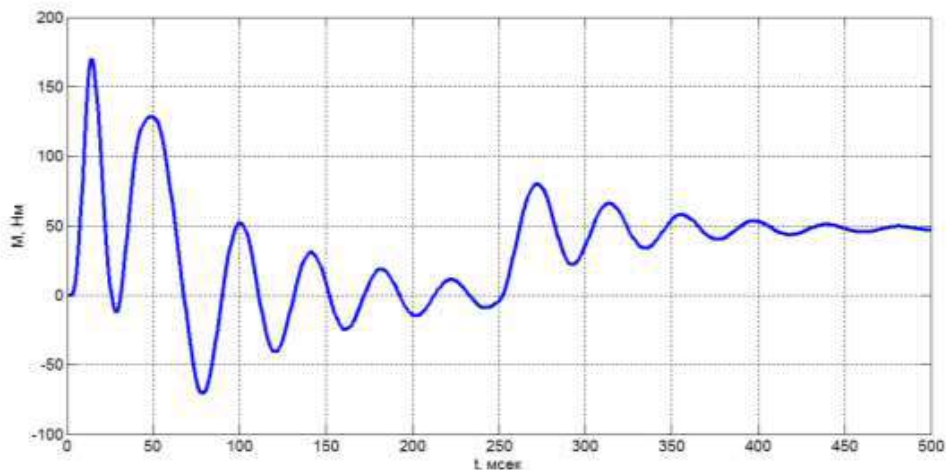
2.4 Қозғалмайтын координаттар жүйесіндегі құрылымдық модельдегі асинхронды қозғалтқыштың динамикалық және статикалық сипаттамаларын зерттеу

Теңдеулер жүйесі (2.10) бойынша координаталардың қозғалмайтын жүйесінде жалпыланған машина моделінің схемасы (2.3-сурет), m -тің динамикалық сипаттамаларын алу үшін $M \square f(t)$ және $\square \square f(t)$. 90 градуска фазада жылжытылған кернеулер модель кірістеріне беріледі: $Usa \square U_{1nm} \cos \square 1t$, $Usb \square U_{1nm} \sin \square 1t$, мұндағы U_{1nm} -номиналды фазалық кернеудің амплитудасы [12].

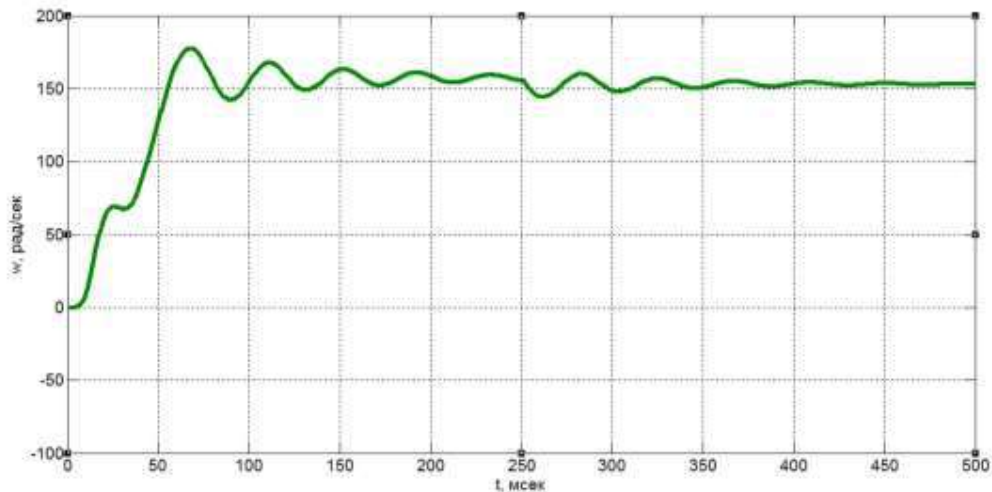


2.3 сурет - MATLAB бағдарламасындағы қозғалмайтын координаттар жүйесіндегі 4A132S4Y3 типті АДКЗ параметрлері бар құрылымдық схема

Модельге еліктегеннен кейін 2.4-суретте көрсетілген динамикалық сипаттамалар алынды:



a)



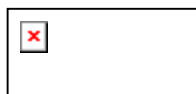
б)

2.4 сурет - Жүктемені іске қосу және Түсіру кезіндегі момент пен жылдамдықтың өтпелі процестерінің осциллограммалары: а) момент; б) жылдамдық

"Usa" және "Usb" блоктары гармоникалық сигнал генераторлары, Usa – косинусоидтар, Usb – синусоидтар. Олар кернеу көздерінің жұмысына еліктейді. Теңшелетін параметрлер: Sine type-синусоидалы толқын түрі (Time Based); амплитуда - сигнал амплитудасы ($\sqrt{2} \cdot U_{\text{эф}} = \sqrt{2} \cdot 230 = 324\text{В}$); Bias – ығысу (синусоидалардың тұрақты құраушысы), берілген схема үшін 0; Frequency – тербелістердің бұрыштық жиілігі ($\omega_0 = 314$); фаза - бастапқы фаза (радианда) 2 – косинусоидтар үшін, 0 – синусоидалар үшін; Sample time-берілген схема үшін уақыт дискрет шамасы 0.

"Transfer Fcn" блогы $W(s) = \frac{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_n s^0}{a_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_n s^0}$ беру функциясы бар

жалпыланған сілтемені жүзеге асырады. Оның көмегімен $W(s) = \frac{1/r}{T_s' s + 1}$ және



беру функциялары бар сілтемелер жүзеге асырылады.

"Scope" блогы (осцилограф) модельдеу кезінде жылдамдық пен моменттің өтпелі графиктерін уақыт бойынша бақылауға мүмкіндік береді.

"Step" блогы қозғалтқыш білігіне жүктеме орнатады ($M_c = M_n$).

"FCN" блогы сырғанауды $s = \frac{\theta_0 - \theta_p}{\theta_0}$ формуласы бойынша есептейді.

"Workspace" блогы модельдеу процесінде алынған деректерді сақтау үшін қажет. Деректер матрицалық түрде сақталады.

Теңшелетін параметрлер: Variable name-деректер жұмыс аймағында сақталатын атау (w, m, s); limit data points to last шекті рұқсат етілген модельдеу

қадамдарының саны, берілген INF схемасы үшін; Decimation – берілген схема үшін деректерді тіркеудің дискреттілігі 1;

Sample time – модель уақытының шамасы, осы схема үшін - 0,5 секунд; Save format-сақталған сандардың форматы, берілген Array схемасы үшін [13].

Модельдеу процесі басталып, аяқталғаннан кейін модельдер "Score" графикалық блогының көмегімен алынған нәтижелерге талдау жасалды, онда жылдамдық пен моменттің өтпелі процестері $\square \square f(t)$ және $M \square f(t)$ көрсетілген. Іске қосудың басында момент пен жылдамдықтың \square_0 ауытқуы байқалады. Қозғалтқыш 0 жұмыс істемейтін жылдамдыққа жетеді. Бос жылдамдық кезінде M моменті 0-ге жетеді. 0,25 секундтан кейін номиналды M_H дейінгі жүктеме кезінде жылдамдықтың номиналды \square_H -ға дейін төмендеуі байқалады.

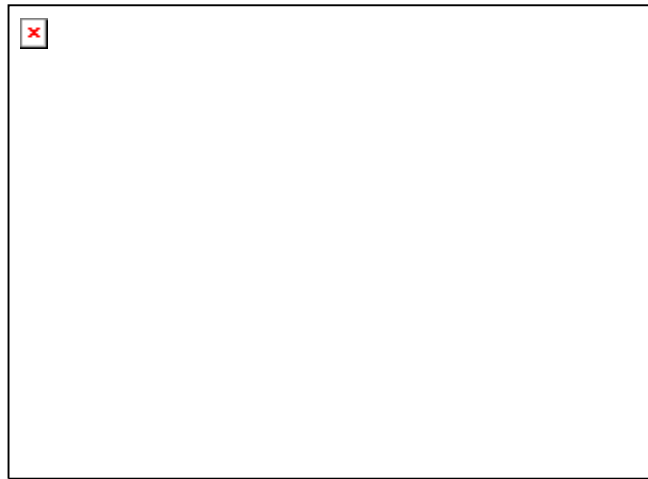
2.5 Айналмалы координаттар жүйесіндегі құрылымдық модельдегі асинхронды қозғалтқыштың динамикалық және статикалық сипаттамаларын зерттеу

\square_k салыстырмалы бұрыштық жылдамдықпен айналатын координаталар жүйесінде "x" нақты осі және "y" қиял осі бар теңдеулер (2.7) оператор түрінде жазылады [8]:

$$\begin{cases} u_{s1} = r(1 + T_s' s) i_{s1} - \theta_i L_s' i_{s1} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R1} - k_R p \theta_n \psi_{R1}; \\ u_{s2} = r(1 + T_s' s) i_{s2} + \theta_i L_s' i_{s1} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R2} + k_R p \theta_n \psi_{R1}; \\ 0 = -k_R R_R i_{s1} + \frac{1}{T_R} \psi_{R1} + s \psi_{R1} - (\theta_i - p \theta_n) \psi_{R1}; \\ 0 = -k_R R_R i_{s2} + \frac{1}{T_R} \psi_{R2} + s \psi_{R2} + (\theta_i - p \theta_n) \psi_{R1}; \\ m = 1,5 p k_R (\psi_{R1} i_{s2} - \psi_{R2} i_{s1}); \\ J s \theta_n = M - M_H. \end{cases} \quad (2.36)$$

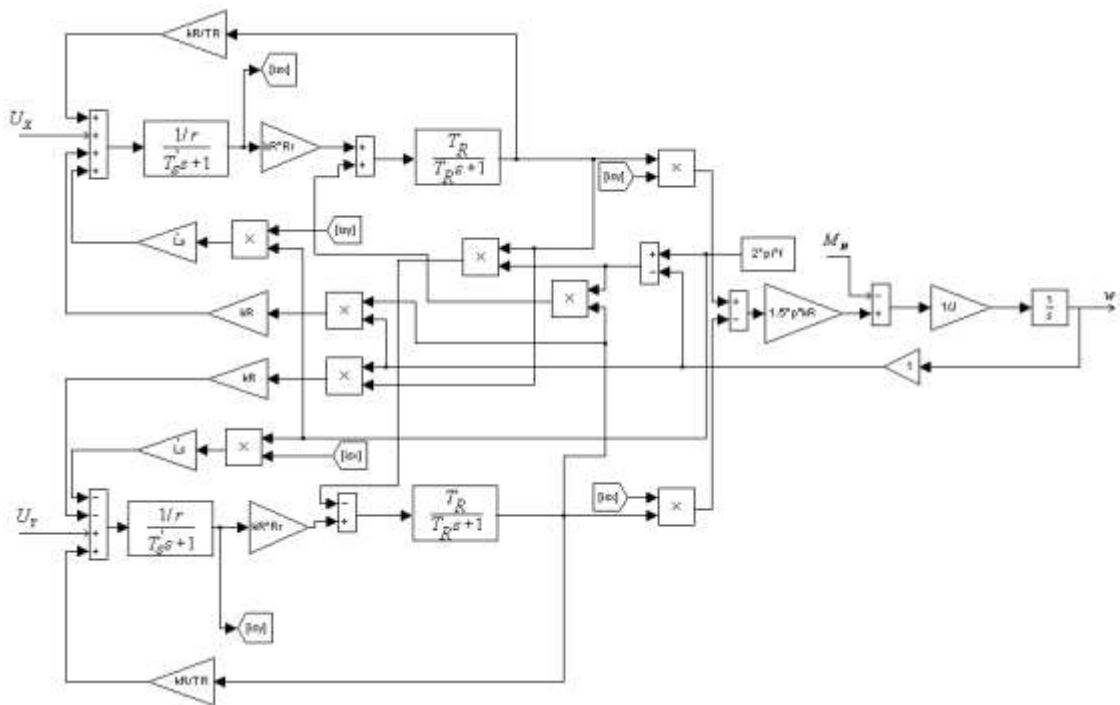
ALKR құрылымдық схемасы және оның моделі координаталардың айналу жылдамдығын анықтайтын негізгі векторды $[U]$ таңдауға байланысты. Негізгі вектор ретінде талдау кезінде координаттар жүйесінің осьтерінің бірімен үйлесетін вектор алынады.

Сонымен, егер u_s векторы негізгі вектор ретінде қабылданса, онда координаталар жүйесі қуат кернеуінің бұрыштық жиілігіне тең 1 жылдамдықпен айналады. Сонымен қатар, егер сіз u_s векторын айналмалы координаттар жүйесінің "x" осімен біріктірсеңіз, онда (2.41) теңдеулерінде $u_{sx} \square U_1, u_{sy} \square 0$ мәнін қабылдауыңыз керек.



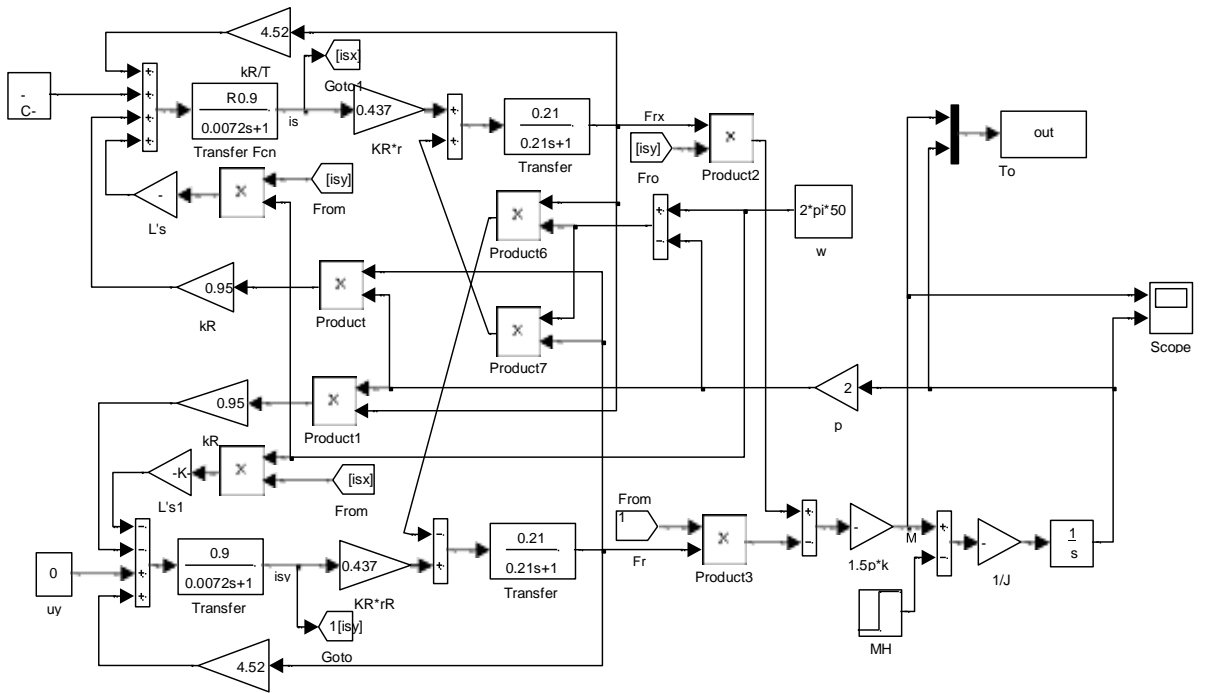
(2.37)

2.5-суретте 2.42 теңдеулер жүйесіне сәйкес құрылған айналмалы координаттар жүйесіндегі АКЗ құрылымдық сызбасы келтірілген.



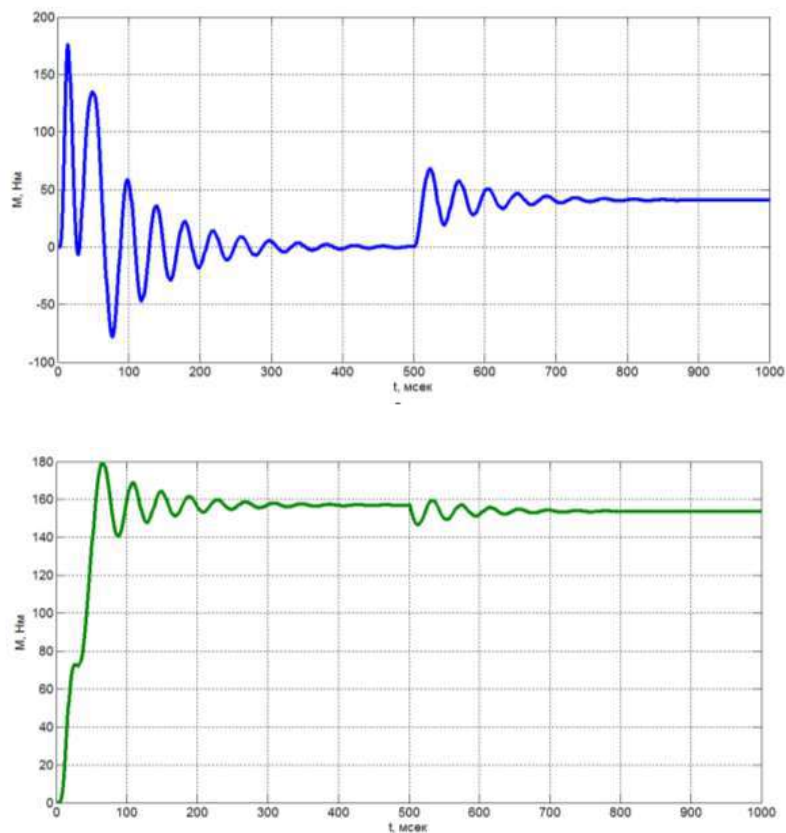
2.5 сурет - Айналмалы координаттар жүйесіндегі АЛТР құрылымдық сұлбасы

Қозғалтқыш параметрлері бар 2.5 сурет құрылымы 2.6 суретте көрсетілген:



2.6 сурет - Айналмалы координаттар жүйесіндегі 4A132S4У3 типті АҚ параметрлері бар құрылымдық схема

Осы құрылымдық модельді модельдеуден кейін алынған өтпелі процестер 2.7-суретте көрсетілген:



2.7 сурет - Жүктемені іске қосу және түсіру кезіндегі өтпелі процестердің Осциллограммалары: а) момент; б) жылдамдық

2.6-суретте $M \square f(t)$ және $\square \square f(t)$ сипаттамаларын алу үшін айналмалы координаттар жүйесінде $P_n=7,5$ кВт ҚТ роторы бар ЭҚ-ның құрылымдық моделі көрсетілген. Бұл модельді модельдеу уақыты-1 секунд.

Іске қосудың басында момент пен жылдамдықтың ауытқуы байқалады. Қозғалтқыш ω_0 жұмыс істемейтін жылдамдыққа жетеді. Бос жылдамдықта M_c моменті 0-ге жетеді. Номиналды M_n - ге жүктеме түсіргенде, доминалды ω_n жылдамдығының төмендеуі байқалады

Жүктемені номиналды M_n -ге түсіру кезінде жылдамдықтың номиналды ω_n -ге дейін төмендеуі байқалады

Бұл модельде қуат кернеуі мен жиілігі режимнің айнымалысы бола отырып, бір-біріне тәуелсіз өзгереді.

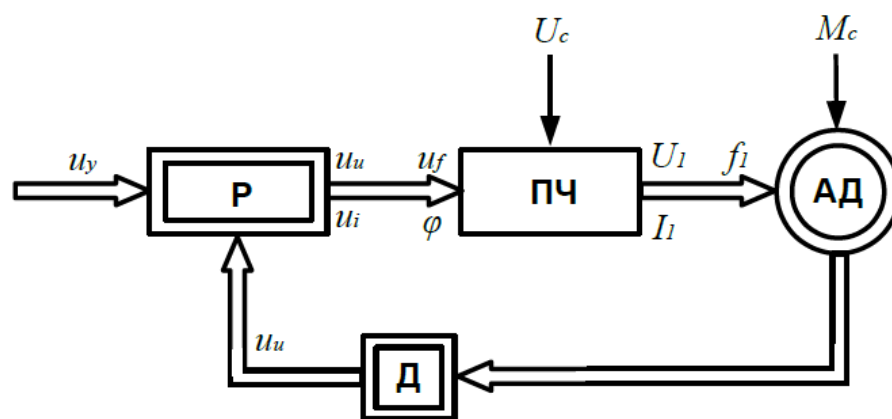
Кернеу векторымен біріктірілген айналмалы координаттар жүйесіндегі АКЗ-ны математикалық сипаттау жиілікті басқару әдістері бар асинхронды жүйелерді синтездеуге негіз болып табылады.

Модельдеу нәтижелерін қозғалмайтын және айналмалы координаттар жүйесінде салыстыра отырып, олардың толық сәйкестігі туралы қорытынды жасауға болады. Бұл электр машинасының өзін талдау үшін координаталар жүйесін таңдау маңызды емес екенін дәлелдейді. Алайда, жабық жүйелерді синтездеу үшін координаттар жүйесін таңдау өте маңызды. Бұл жағдай әсіресе реттегіштердің параметрлерін синтездеу кезінде және "Simulink" пакетіндегі бүкіл жүйені модельдеу кезінде көрінеді, өйткені осы пакеттегі мәселелерді шешу кезінде координаттар жүйесін дұрыс таңдау арқылы ғана айналып өтуге болатын шектеулер бар. Жоғарыда қарастырылған АКЗ-ның математикалық сипаттамалары машинаны кернеу көзінен қоректендіру жағдайы үшін жарамды. Мұндай көз тұйық жүйелерде күштік реттегіш қызметін атқаратын желі немесе дербес кернеу инверторы болуы мүмкін [12].

3 қозғалыс механизмдерінің екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің математикалық моделін жасау және зерттеу

3.1 "Жиілік түрлендіргіші - асинхронды қозғалтқыш (АД)» жүйенің бір қозғалтқышты электр жетегінің математикалық сипаттамасы

Асинхронды жиілікті реттейтін электр жетегінің қажетті статикалық және динамикалық қасиеттерін қалыптастыру оның координаттарын басқарудың жабық жүйесінде ғана мүмкін болады. Мұндай жүйенің жалпыланған функционалды схемасы 3.1 суретте көрсетілген[14]:



P-реттегіш; Д-электржетектің айнымалы датчигі; ПЧ– жиілік түрлендіргіші.

3.1-сурет - АҚ-ЖТ тұйық жүйесінің функционалдық схемасы

Қазіргі уақытта кері байланысты қолданудың әртүрлі нұсқалары көп жағдайда қарастырылады. Сонымен қатар, белгілі бір деңгейде жылдамдықты реттеу мен ұстап тұру ауқымын арттыру үшін теріс жылдамдық кері байланысын енгізу қажет. Сондықтан электр жетегінің өтпелі процестерінің математикалық сипаттамасында бұл кері байланыс ескеріледі.

"АҚ-ЖТ" жүйесі сызықты емес, онда шығыс шамалары кіріс сызықты емес тәуелділіктермен байланысты, динамика процестері күрделі дифференциалдық теңдеулермен сипатталады. Сондықтан барлық сілтемелер сызықты. Сызудың арқасында жүйені әр түрлі өлшемдер мен теоремаларға сәйкес тұрақтылық үшін зерттеу айтарлықтай жеңілдетілген.

Жылдамдық бойынша теріс кері байланысы бар "АҚ-ЖТ" жүйесінің сызықтық құрылымдық схемасы, бұл жағдайда 3.2-суретте көрсетілген[4].

Схемада мынадай белгілер қабылданады:

□ - АҚ сызықтық механикалық сипаттамасының қаттылық модулі;

$T\omega$ - статор және ротордың тізбектерінің эквивалентті электромагниттік уақыт тұрақтысы;

Құрылымдық тізбектің W_1 берілу функциясына сәйкес қозғалыс теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta M - \Delta M_c} = \frac{1}{\beta T_M p}$$

немесе (3.1)

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M} (\Delta M - \Delta M_c)$$

W_2 беру функциясы бойынша келесі қатынас бар:

$$\frac{\Delta M}{\Delta \omega_0 - \Delta \omega} = \frac{\beta}{1 + T_e p}$$
(3.2)

W_3 беру функциясынан туындайтын жиілік түрлендіргішінің теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$T_{\Pi} = \frac{d\Delta \omega_0}{dt} + \Delta \omega_0 = k_{\Pi} \Delta U_{PC}$$
(3.3)

ал беріліс функциясы W_4 болатын РС теңдеумен ұсынылған:

$$\Delta U_{PC} = k_{PC} (\Delta U_{ZC} - \Delta U_{OC}) + \int_0^t (\Delta U_{ZC} - \Delta U_{OC}) dt$$

немесе (3.4)

$$T_{PC} \frac{d\Delta U_{PC}}{dt} = k_{PC} T_{PC} \frac{d\Delta U_y}{dt} + \Delta U_y$$

ΔU_y деңгейінің өсуі келесі түрде жазылады:

$$\boxed{\times}$$
(3.5)

мұндағы $\boxed{\times}$ - сигналдың өсуі;

k_{OC} - жылдамдық бойынша кері байланыс коэффициенті.

3.2 "Жиілік түрлендіргіші – асинхронды қозғалтқыш" жүйесінің жылдамдығы бойынша кері байланыс коэффициентін есептеу әдістемесі»

АҚ-ЖТ жүйесіндегі реттеу сапасының тұрақтылығы мен динамикалық көрсеткіштері көбінесе жылдамдық бойынша кері байланыс коэффициенттеріне байланысты.

Қозғалтқыштардың жылдамдықтарының сәйкес келмеуі үшін кері байланыс коэффициенттерін анықтау үшін алдымен көп қозғалтқышты асинхронды электр жетегіндегі жиілік түрлендіргіші бар әр асинхронды қозғалтқыш үшін кері байланыс коэффициенттерін анықтау қажет, яғни тізбектелген түзетумен "ЖТ-АҚ" жабық бір қозғалтқыш жүйесі үшін. Бұл жүйе бойынша есептеу 4А132S4У3 типті қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды электр қозғалтқыш үшін жүргізіледі.

3.1-кесте-4A132S4У3 асинхронды электр қозғалтқышының паспорттық деректері

Параметр	Мәні	Өлшем бірлігі
P_H	7,5	кВт
$n_{ном}$	1455	об/мин
(КПД)	87,5	%
$\cos\varphi_H$	0,86	-
M_{max}/M_H	3	-
M_{II}/M_H	2,2	-
M_{min}/M_H	1,7	-
I_{II}/I_H	7,5	-
J	$2,75 \cdot 10^{-2}$	кг*м ²

"ЖТ-АҚ" жүйесінің бір қозғалтқышты электр жетегінің динамикасы құрылымдық сызбаға сәйкес дифференциалдық теңдеумен сипатталады [4]:

$$T_{e(1,2)} T_{M(1,2)} \frac{d^2 \Delta\omega_{(1,2)}}{dt^2} + T_{M(1,2)} \frac{d\Delta\omega_{(1,2)}}{dt} + \Delta\omega_{(1,2)} \quad (3.7)$$

мұндағы $T_{e(1,2)}$ - 1-2 асинхронды қозғалтқыштың статор және ротор тізбектерінің эквивалентті электромагниттік уақыт тұрақтысы, формула бойынша анықталады:

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0el.m ag} \cdot S_{KP}}$$

(3.8)

$T_{M(1,2)}$ - формула бойынша анықталатын электромеханикалық уақыт тұрақтысы:

$$T_M = \frac{1}{\beta} \quad (3.9)$$

$\omega_{(1,2)}$ - 1-2 АҚ-ның білігінің бұрыштық жылдамдығы.

Содан кейін 4a132s4y3 типті электр қозғалтқышына арналған ішкі кері байланысы бар "ПЧ-АД" бір қозғалтқыш жүйесі келесі түрде жазылады:

$$0,001 \frac{d^2 \Delta\omega}{dt^2} + 0,037 \frac{d\Delta\omega}{dt} + \Delta\omega = 0,5\omega_0 \quad (3.10)$$

Дифференциалдық теңдеуге сәйкес (3.5), $T_{II} = 0,001$ сек ескере отырып, 4A132S4У3 типті электр қозғалтқышына арналған ЖТ динамикасы келесі түрде

жазылады:

$$\frac{d\Delta\omega_0}{dt} = \frac{k_{\Pi}}{0,001} \Delta u_{PC} - 100\Delta\omega_0 \quad (3.11)$$

Жылдамдық реттегіші ПИ реттегіші екенін ескере отырып, динамиканы сипаттайтын теңдеу келесі түрде жазылады:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta u_{PC}}{\Delta u_{z.c} - k_{0.c}\omega} &= \frac{T_1 p + 1}{T_2 p} \\ T_2 \frac{d\Delta u_{PC}}{dt} &= T_1 \frac{d\Delta u_{z.c}}{dt} + \Delta u_{z.c} - k_{0.c} T_1 \frac{d\omega}{dt} - k_{0.c} \Delta\omega \\ \frac{d\Delta u_{PC}}{dt} &= \frac{1}{T_2} \Delta u_{z.c} - \frac{k_{0.c} T_1}{T_2} \frac{d\omega}{dt} - \frac{k_{0.c}}{T_2} \Delta\omega \end{aligned} \quad (3.12)$$

мұндағы T_1 , T_2 - ПИ реттеушінің пропорционалды және интегралды компоненттері, олардың көмегімен жылдамдықты реттегіш байланысының келесі параметрлері анықталады:

$$\begin{aligned} k_{PC} &= \frac{1}{T_1} \\ T_{PC} &= T_1 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Құрылымдық тізбек байланыстарының динамикасын сипаттайтын теңдеулер жиынтығынан тізбектелген түзетумен бағынышты реттеудің барлық жабық бір қозғалтқыш жүйесі үшін жалпыланған теңдеулер жүйесі жасалады:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M} M - \frac{1}{\beta T_M} M_c \\ \frac{dM}{dt} = \frac{\beta}{T_e} \Delta\omega_{01} - \frac{\beta}{T_e} \Delta\omega - \frac{1}{T_e} M \\ \frac{d\Delta\omega_0}{dt} = \frac{k_{\Pi}}{T_{\Pi}} \Delta u_{z.c} - \frac{1}{T_{\Pi}} \Delta\omega_0 \\ \frac{d\Delta u_{PC}}{dt} = \frac{d\Delta u_{PC}}{dt} = \frac{1}{T_2} \Delta u_{z.c} - \frac{k_{0.c} T_1}{T_2} \frac{d\omega}{dt} - \frac{k_{0.c}}{T_2} \Delta\omega \end{cases} \quad (3.14)$$

Осы дифференциалдық теңдеулер жүйесі негізінде кері байланыс коэффициентін есептеу қажет болады. Қойылған есепті шешудің ыңғайлылығы үшін Дифференциалдық теңдеу (3.9) келесі түрде ұсынылады (4a132s4y3 типті электр қозғалтқышының дайын параметрлерімен):

$$\begin{cases} \frac{d \Delta \omega}{d t} = y \\ \frac{d y}{d t} = 500 \Delta \omega_0 - 37 y - 1000 \Delta \omega \end{cases} \quad (3.15)$$

Әрі қарай, ыңғайлы болу үшін шешімдер $\Delta\omega=x_1$, $y=x_2$, $\Delta\omega_0=x_3$, $u_{pc}=x_4$ қабылданады. Сонда теңдеулер жүйесі қабылдайды түрі:

$$\begin{cases} \frac{d x_1}{d t} = x_2 \\ \frac{d x_2}{d t} = 500 x_3 - 41,2 x_2 - 1000 x_1 \\ \frac{d x_3}{d t} = \frac{k_{0,c}}{0,001} x_4 - 1000 x_3 \\ \frac{d x_4}{d t} = \frac{1}{T_1} (1 - (\frac{k_{0,c} T_1}{T_1}) x_1 - \frac{k_{0,c}}{T_1} x_2) \end{cases} \quad (3.16)$$

Осылайша, кері байланыс коэффициентін анықтау жоғарыда аталған теңдеулер жүйесінен алынады.

Жүйенің тұрақтылық жағдайынан кері байланыс коэффициентін анықтау үшін MATLAB бағдарламасында іске асырылатын арнайы бағдарлама "m-file" типті файлды құру және тиісті командаларды теру арқылы қолданылады.

```

1 function SIMTEX;
2 global kpc;
3 global koo;
4 global T1;
5 global T2;
6 global a1;
7 global a2;
8 global a3;
9 global a4;
10 global a5;
11 global a6;
12 global a7;
13 global a8;
14 h=4;
15 r=0; a1=0; a3=0; a5=0; a7=0;
16 m=500;
17 for i=1:m
18     h=h/5;
19     ql=1e6;
20     kpc=rand*10; koo=rand; T1=rand; T2=rand*0.
21     x(4)=0.1;
22     while x(4)<=0.9
23         x(3)=0.1;
24         while x(3)<=0.9
25             x(2)=0.1;
26             while x(2)<=0.9
27                 x(1)=0.1;
28                 while x(1)<=0.9
29                     h1=0.01;
30                     j=1;
31                     while i<=m
32                         u(1)=x(1)+h1;
33                         y(1)=x(1)-h1;
34                         j=j+1;
35                         while j<=m
36                             if j==4 u(2)=x(2)+y(2);x(2)=x(2)/rand;
37                                 j=j+1;
38                             end
39                             k=1; p1=0; p2=0;
40                             while k<=m i=k;
41                                 while i<=m a(k,i)=rand;
42                                 p1=p1+a(k,i)*u(k)*m(i);
43                                 p2=p2+a(k,i)*v(k)*v(i);
44                                 i=i+1;end
45                                 k=k+1;end
46                                 a(i)=(p1-p2)/2/h1;
47                                 j=i+1;
48                                 end
49                                 d(1)= x(2);
50                                 d(2)= 500*x(3)-37*x(2)-1000*x(1);
51                                 d(3)= 1000*kpc*x(4)-1000*x(3);
52                                 d(4)= -(koo*T1)/T2)*x(2)-(koo/T2)*x(1);
53                                 a=0; i=1;
54                                 for j=1:n
55                                     a=a+abs(x(1))^2*a(i)*d(i);
56                                 end
57                                 q=a;
58                                 if q<=ql ql=q;rand
59                                 x(1)=x(1)+hr
60                                 end

```

3.3 сурет-кері байланыс коэффициентін есептеу бағдарламасы

```

41 - x(2)=x(2)+hr;
42 - end
43 - x(3)=x(3)+hr;
44 - end
45 - x(4)=x(4)+hr;
46 - end
47 - z=z+1;
48 - n1=n1+kpr;
49 - s2=sqrt((s1/n)^2);
50 - s3=s3+koc;
51 - s4=sqrt((s3/n)^2);
52 - s5=s5+T1;
53 - s6=sqrt((s5/n)^2);
54 - s7=s7+T2;
55 - s8=sqrt((s7/n)^2);
56 - if z>=m break;end
57 - end
58 - disp('s2=');disp(s2);
59 - disp('s4=');disp(s4);
60 - disp('s6=');disp(s6);
61 - disp('s8=');disp(s8);
62 - x0 = [0;0;0;0];
63 - [T, X] = ode45(@galk, [0 3.5], x0);
64 - plot(T, X(:,1)*2, 'k-', T, X(:,2), 'r-');
65 - grid
66 - function dx = galk(t, X)
67 - dx=zeros(4,1);
68 - kpr=a2; koc=a4; T1=a6; T2=a8;
69 - dx(1)= x(2);
70 - dx(2)= 500*x(3)-37*x(2)-1000*x(1);
71 -
72 -
73 -
74 -
75 -
76 -
77 -
78 -
79 -
80 -
81 -
82 -
83 -
84 -
85 -
86 -
87 -
88 -
89 -
90 -
91 - dx(5)= 1000*kpr*x(4)-1000*x(5);
92 - dx(4)=(1/T2)*10 - ((koc*T1)/T2)*x(5)-(koc/T1);
93 - end
94 - end

```

```

MATLAB Desktop Keyboard Shortcuts, such as Ctrl+S, are now customizable.
In addition, many keyboard shortcuts have changed for improved consistency
across the desktop.

To customize keyboard shortcuts, use Preferences. From there, you can also
restore previous default settings by selecting "Restore Windows Defaults" from
the active settings drop-down list. For more information, see Help.

Click here if you do not want to see this message again.

s2=
    4.9414

s4=
    0.1042

s6=
    0.4822

s8=
    0.1887

%>>

```

3.4-сурет - кері байланыстың оңтайлы коэффициентін есептеу бағдарламасының жалғасы

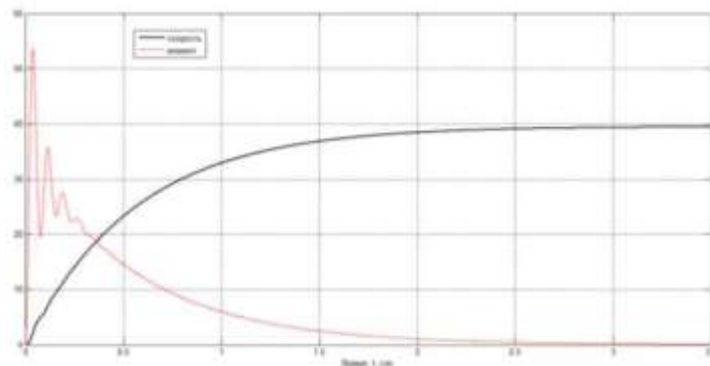
"Command window" терезесінде көрсетілген мәліметтерге сәйкес келесі коэффициенттер есептеледі: s_2, s_4, s_6, s_8 .

Осының негізінде сәйкестік 3.5-суретте байқалатын тұрақтылық жағдайынан бір қозғалтқышты жабық жүйенің параметрлері табылды: $K_{PC}=5, K_{oc}=0,5; T_1=0,5; T_2=0,1$

Осыдан:

$$k_{PC} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{0,5}{0,1} = 5$$

$$T_{PC} = T_2 = 0,1$$



3.5-сурет-оңтайлы кері байланыс коэффициенті бар жабық бір қозғалтқышты электр жетегінің өтпелі процестері.

3.5-суретке сәйкес, жылдамдық пен сәтте өтпелі процестердің сапасы оңтайлы болып табылады. Осыған сүйене отырып, алынған кері байланыс коэффициенті бар қарастырылған жабық бір қозғалтқыш жүйесі тұрақты деп айта аламыз.

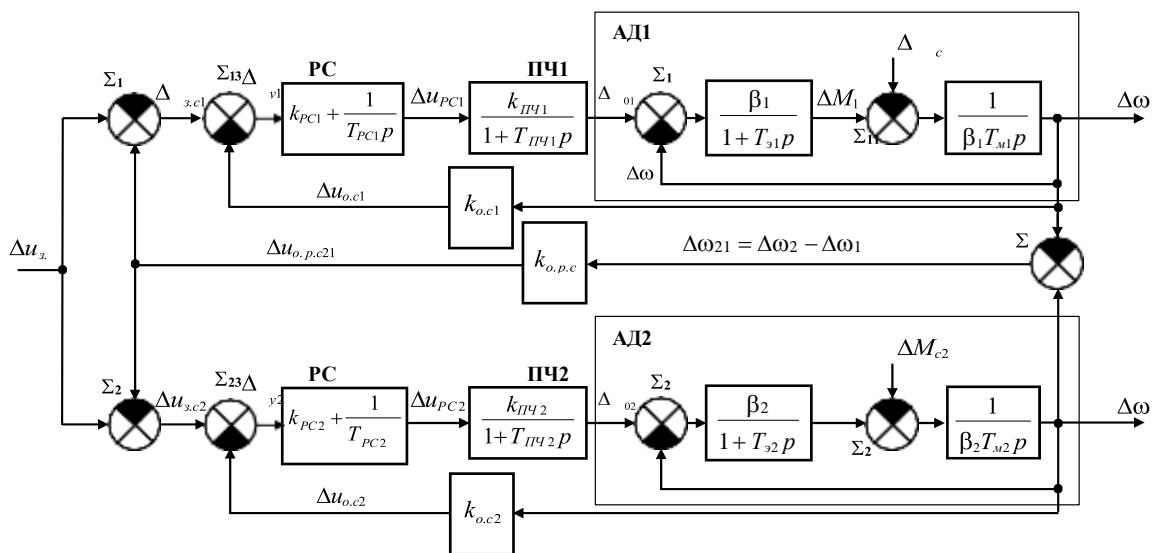
3.3 "Жиілік түрлендіргіші-асинхронды қозғалтқыш" жүйесінің екі қозғалтқыш электр жетегіндегі жылдамдықтардың сәйкес келмеуі бойынша жалпы кері байланыс коэффициентін есептеу»

Жиілік түрлендіргіштері бар синхронды айнарудың екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің математикалық моделі дифференциалдық теңдеулер жүйесімен ұсынылған:

$$\begin{cases}
 \frac{d \Delta \theta_{11}}{dt} = \frac{1}{\beta_1 T_{H1}} M_{11} - \frac{1}{\beta_1 T_{H1}} M_{c1} \\
 \frac{d M_{11}}{dt} = \frac{\beta_1}{T_{e1}} \Delta \theta_{11} - \frac{\beta_1}{T_{e1}} \Delta \theta_{12} - \frac{1}{T_{e1}} M_{11} \\
 \frac{d \Delta \theta_{12}}{dt} = \frac{k_{H1}}{T_{H1}} \Delta \psi_{rc1} - \frac{1}{T_{H1}} \Delta \theta_{11} \\
 \frac{d \Delta \psi_{rc1}}{dt} = \frac{k_{rc1} k_{oc1}}{\beta_1 T_{H1}} (\Delta M_{11} - \Delta M_{c1}) - \frac{k_{rc1} (k_{oc1} + k_{oc1})}{\beta_1 T_{H1}} (\Delta M_{11} - \Delta M_{c1}) + \\
 + \frac{\Delta \psi_{rc1}}{T_{rc1}} - \left(\frac{k_{oc1} + k_{oc1}}{T_{rc1}} \right) \Delta \theta_{11} + \frac{k_{oc1}}{T_{rc1}} \Delta \theta_{12} \\
 \frac{d \Delta \theta_{21}}{dt} = \frac{1}{\beta_1 T_{H2}} M_{21} - \frac{1}{\beta_1 T_{H2}} M_{c1} \\
 \frac{d M_{21}}{dt} = \frac{\beta_2}{T_{e2}} \Delta \theta_{21} - \frac{\beta_2}{T_{e2}} \Delta \theta_{22} - \frac{1}{T_{e2}} M_{21} \\
 \frac{d \Delta \theta_{22}}{dt} = \frac{k_{H2}}{T_{H2}} \Delta \psi_{rc2} - \frac{1}{T_{H2}} \Delta \theta_{21} \\
 \frac{d \Delta \psi_{rc2}}{dt} = \frac{k_{rc2} k_{oc2}}{\beta_1 T_{H1}} (\Delta M_{21} - \Delta M_{c1}) - \frac{k_{rc2} k_{oc2}}{\beta_1 T_{H1}} (\Delta M_{21} - \Delta M_{c1})
 \end{cases} \quad (3.17)$$

мұнда электр қозғалтқыштарының бұрыштық айналу жылдамдығын синхрондау үшін Corsu коэффициентімен сәйкес келмейтін жылдамдықтарға кері байланыс енгізілді

Екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің құрылымдық схемасы 3.6 суретте көрсетілген.



Сурет 3.6 - Жиілік түрлендіргіші бар екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің құрылымдық схемасы

Жиілік түрлендіргіші бар екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегі екі торлы роторлы асинхронды қозғалтқыштан, екі жиілікті түрлендіргіштен, екі жылдамдықты реттегіштен тұрады. Жиілік түрлендіргіші бар әр асинхронды қозғалтқыштың кері байланыс коэффициенттері бар жылдамдыққа кері байланысы бар $k_{o.c1}$, $k_{o.c2}$. Қозғалтқыштардың синхронды айналуын қамтамасыз ету үшін қозғалтқыштардың ($k_{o.p.c}$) жылдамдықтарының сәйкес келмеуі бойынша қосымша кері байланыс енгізілді. Бірінші жылдамдығы ω_1 және екінші ω_2 қозғалтқыштар құрылғыда 1-ші жиіліктермен ω_1 салыстырылады, шығыс сигналы $u_{o.p.c21}$ $k_{o.p.c}$ беріледі:

- берілген $u_{o.p.c21}$ сигналы $u_{3.c}$ басқарудың жетекші сигналымен салыстырылатын ω_{14} құрылғысына, содан кейін $u_{3.c1}$ басқару сигналы беріледі.

- берілген сигнал $u_{3.c}$ басқару сигналымен салыстырылатын ω_{24} құрылғыға . содан кейін Z . $u_{3.c2}$ басқару сигналы беріледі, $u_{3.c2}$ мәні екі қозғалтқышты электр жетегіне беріледі.

Қуаттылығы 7,5 кВт болатын 4a132s4y3 типті қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды электр қозғалтқышының параметрлері бойынша екі қозғалтқышты электр жетегінің қозғалыс тұрақтылығы MATLAB бағдарламасында зерттелді [4].

MATLAB-та мәселені шешудің ыңғайлылығы үшін жүйенің айнымалы мәндері (3.17) белгіленеді:

$$\omega_1 \omega x(1); \omega M_{\omega 1} \omega x(2); \omega \omega_{01} \omega x(3); \omega u_{PC1} \omega x(4); \quad (3.18)$$

$\square \square_2 \square x(5); \square M_{\text{Э}2} \square x(6); \square \square_{02} \square x(7); \square u_{PC1} \square x(8).$

Жоғарыда келтірілген коэффициенттер матрицасын ескере отырып, екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің тұрақты айналу тұрақтылығын есептеу 3.7-суретте келтірілген.

Есептеу нәтижелері көрсеткендей, матрицаның тамырларының нақты компоненттері теріс, және бұл $k_{o.c1}, k_{o.c2}$ жиілік түрлендіргіші бар әр асинхронды қозғалтқыштың кері байланысының таңдалған коэффициенттерімен және $k_{o.p.c}$ жиілік түрлендіргіші бар екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің қозғалтқыштарының жылдамдығын және жиілік түрлендіргіші бар асинхронды қозғалтқыштың есептелген параметрлерімен сәйкес келмейтінін көрсетеді. Жиілік түрлендіргіштері бар екі қозғалтқышты электр жетегінің жүйесі тұрақты.

Алынған дифференциалдық теңдеулер жүйесі (3.17) бойынша MATLAB бағдарламалық пакетінде жиілік түрлендіргіштері бар екі қозғалтқышты асинхронды Электржетекті модельдеу жүргізілді.

```

>> b1=10.7; Te1=0.05; Tm1=0.0019; Krs1=0.5; Trs1=0.1; Kpch1=1.15; Tpch1=0.001;
>> b2=10.7; Te2=0.05; Tm2=0.0019; Krs2=0.5; Trs2=0.1; Kpch2=1.15; Tpch2=0.001;
>> Kos1=0.4; Kos2=0.4; Kors=0.6;
>> syms a
>> A=[0 1/(b1*Tm1) 0 0 0 0 0; -b1/Te1 -1/Te1 b1/Te1 0 0 0 0; ...
0 0 -1/Tpch1 Kpch1/Tpch1 0 0 0 0; ...
-(Kors+Krs1)/Trs1 -Krs1*(Kors+Kos1)/(b1*Tm1) 0 0 Kors/Trs1 Krs1*Kors/(b2*Tm2) 0 0; ...
0 0 0 0 1/(b2*Tm2) 0 0; 0 0 0 0 -b2/Te2 -1/Te2 b2/Te2 0; ...
0 0 0 0 0 -1/Tpch2 Kpch2/Tpch2; ...
Kors/Trs2 Krs2*Kors/(b1*Tm1) 0 0 -(Kors+Kos2)/Trs1 -Krs2*(Kors+Kos2)/(b2*Tm2) 0 0];
>> A=-A;
>> B=(eye(8)+A);
>> det(B)

```

```

>> b1=10.7; Te1=0.05; Tm1=0.0019; Krs1=0.5; Trs1=0.1; Kpch1=1.15; Tpch1=0.001;
>> b2=10.7; Te2=0.05; Tm2=0.0019; Krs2=0.5; Trs2=0.1; Kpch2=1.15; Tpch2=0.001;
>> Kos1=0.4; Kos2=0.4; Kors=0.6;
>> syms a
>> A=[0 1/(b1*Tm1) 0 0 0 0 0; -b1/Te1 -1/Te1 b1/Te1 0 0 0 0; ...
0 0 -1/Tpch1 Kpch1/Tpch1 0 0 0 0; ...
-(Kors+Krs1)/Trs1 -Krs1*(Kors+Kos1)/(b1*Tm1) 0 0 Kors/Trs1 Krs1*Kors/(b2*Tm2) 0 0; ...
0 0 0 0 1/(b2*Tm2) 0 0; 0 0 0 0 -b2/Te2 -1/Te2 b2/Te2 0; ...
0 0 0 0 0 -1/Tpch2 Kpch2/Tpch2; ...
Kors/Trs2 Krs2*Kors/(b1*Tm1) 0 0 -(Kors+Kos2)/Trs1 -Krs2*(Kors+Kos2)/(b2*Tm2) 0 0];
>> A=-A;
>> B=(eye(8)+A);
>> det(B)

ans =

a^8+2040*a^7+20927600/19*a^6+1813200000/19*a^5+12637570000000/361*a^4+4590054
459005400000000/361 97265400000000000/361 1331010000000000000/361];
>> z=roots(d)

```

```

z =

1.0e+003 *

-1.0094
-1.0024
-0.0003 + 0.1405i
-0.0003 - 0.1405i
-0.0067 + 0.1135i
-0.0067 - 0.1135i
-0.0143

```

Сурет 3.7 - Екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің тұрақтылығын есептеу бағдарламасы және нәтижелері.

3.8-суретте әртүрлі статикалық жүктемелер кезінде екі қозғалтқышты электр жетегінің өтпелі процестерін есептеу бағдарламасы көрсетілген.


```

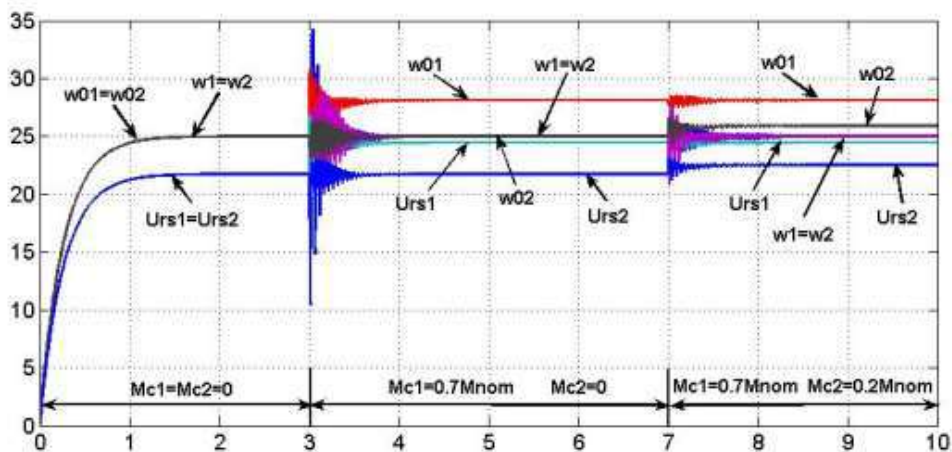
Editor - C:\Program Files\MATLAB71\work\model.m
File Edit Test Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 function dx=model(t,x)
2 dx=zeros(8,1);
3 b1=10.7; Te1=0.05; Tm1=0.0019; Krs1=0.5; Trs1=0.1; Kpch1=1.15; Tpch1=0.001;
4 b2=10.7; Te2=0.05; Tm2=0.0019; Krs2=0.5; Trs2=0.1; Kpch2=1.15; Tpch2=0.001;
5 Kos1=0.4; Kos2=0.4; Kors=0.6; Uzs=10;
6 Mnom=47.7;
7 if t<=3 Mc1=0; else Mc1=0.7*Mnom; end;
8 if t<=7 Mc2=0; else Mc2=0.2*Mnom; end;
9 dx(1)=(1/(b1*Tm1))*x(2)-(1/(b1*Tm1))*Mc1;
10 dx(2)=(b1/Te1)*x(3)-(b1/Te1)*x(1)-(1/Te1)*x(2);
11 dx(3)=(Kpch1/Tpch1)*x(4)-(1/Tpch1)*x(3);
12 dx(4)=(Krs1*Kors)/(b2*Tm2)*x(6)-Mc2-(Krs1*(Kors+Kos1))/(b2*Tm2)*x(2)-Mc1+...
13 Uzs/Trs1-(Kors+Kos1)/Trs1)*x(1)+(Kors/Trs1)*x(5);
14 dx(5)=(1/(b2*Tm2))*x(6)-(1/(b2*Tm2))*Mc2;
15 dx(6)=(b2/Te2)*x(7)-(b2/Te2)*x(5)-(1/Te2)*x(6);
16 dx(7)=(Kpch2/Tpch2)*x(8)-(1/Tpch2)*x(7);
17 dx(8)=(Krs2*Kors)/(b1*Tm1)*x(2)-Mc1-(Krs2*(Kors+Kos2))/(b2*Tm2)*x(6)-Mc2+...
18 Uzs/Trs2-(Kors+Kos2)/Trs1)*x(5)+(Kors/Trs2)*x(1);
19 end

```

Сурет 3.8 - Әр түрлі статикалық жүктемелер кезінде екі қозғалтқышты электр жетегінің өтпелі процестерін есептеу бағдарламасы.

Дифференциалдық теңдеулерді шешу үшін MATLAB – та ode15s шешімі қолданылды-сандық дифференциалдау формулаларын қолдана отырып, айнымалы ретті көп сатылы әдіс (1-ден 5-ке дейін, әдепкі 5).

3.9-суретте 3.7-суретті есептеу бағдарламасына сәйкес әртүрлі статикалық жүктемелер кезінде ӨЖ бар екі қозғалтқышты асинхронды электржетектің өтпелі процестерінің осциллограммалары көрсетілген.



Сурет 3.9 - Әр түрлі статикалық жүктемелер кезінде жиілік түрлендіргіші бар екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің өтпелі процестерінің осциллограммалары.

Алынған өтпелі процестерден көріп отырғанымыздай, Электр қозғалтқыштарының білігіне статикалық жүктемелердің әртүрлі мәндерінде жиілік түрлендіргіштері бар екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің жүйесі бірдей бұрыштық жылдамдықпен Электр қозғалтқыштарының

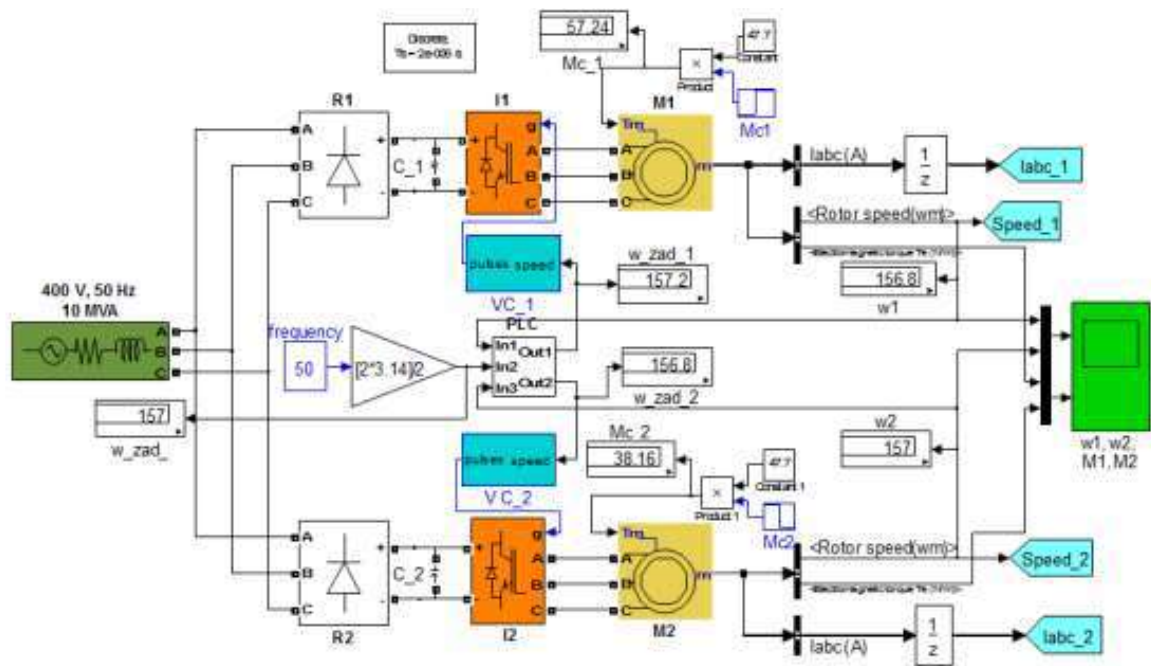
келісілген айналуын сақтайды. Электр қозғалтқыштарын Электр қозғалтқыштарының білігіне жүктемесіз іске қосқан кезде, суретке сәйкес, ара ЖТ 1-2 жиілік түрлендіргіштерінің, РС 1-2 жылдамдық реттегіштерінің шығу сигналдары тең ($U_{01} = U_{02}$ и $U_{PC1} = U_{PC2}$), сәйкесінше қозғалтқыштардың жылдамдығы $n_{01} = n_{02}$ да тең болады. $M_{c1} = 0.7M_{ном}$ мәні бар бірінші қозғалтқыштың білігіне статикалық жүктемені салу кезінде уақыт моменті $t=3C$ (бұл ретте $M_{c2} = 0$), бірінші, екінші қозғалтқыштардың жылдамдығы РС1 жылдамдық реттегішінің шығуынан, тиісінше, ЖТ1 жиілік түрлендіргішінің шығуынан АҚ1 жоғары сигнал беру есебінен теңестіріледі, осылайша екі қозғалтқышты электр жетегінің электр қозғалтқыштарының келісілген айналуын қамтамасыз етеді. $T = 7c$ уақыт сәтінде $M_{c2} = 0.2M_{ном}$ бар екінші қозғалтқыштың білігіне жүктеме түсіріледі (бұл жағдайда $nom = 0.7 M_{1}$ бар, ол өзгермейді). Сонымен қатар, сурет графигінен көрініп тұрғандай, РС2 және ЖТ2 сигналы жоғарылайды, осылайша электр қозғалтқыштарының келісілген айналуы қамтамасыз етіледі, ал РС1 және ЖТ1 сигналдары өзгеріссіз қалады.

Эксперименттердің нәтижесі әртүрлі статикалық жүктемелер кезінде жиілік түрлендіргіштері бар екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің жүйесі электр қозғалтқыштарының келісілген айналуын қолдайтындығын көрсетеді.

3.4 MATLAB-да тіректі кранның қозғалыс механизмдерінің екі қозғалтқышты электр жетегін компьютерлік модельдеу

3.10-суретте келтірілген MATLAB ортасында келісілген айнарудың екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің моделі жасалды. Екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегі жүйесі MATLAB бағдарламасында арнайы Simulink құралымен модельденеді. Simulink асинхронды электр қозғалтқыштарының барлық статикалық және динамикалық жұмыс режимдерін жоғары дәлдікпен модельдеуге мүмкіндік береді. Simpowersystem бағдарламалық кітапханасында басқару жүйесін құру үшін барлық қажетті блоктар бар. Өзірленген модель қуаты 7,5 кВт қысқа тұйықталған роторы (M1, M2) бар екі асинхронды электр қозғалтқыштарының параллель жұмысын имитациялайды.

M1, M2 бір кернеу көзінен ($U=400V$, $f=50$ Гц) қуат алатын екі бөлек жиілік түрлендіргіштерімен басқарылады. Жиілік түрлендіргіштері жиынтықтан тұрады:



Сурет 3.10 - Matlab-да екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің моделі

- Ларионов схемасы бойынша (R1, R2) басқарылмайтын диодтық көпірі бар түзеткіш блоктар);
- пульсацияны тегістеуге арналған конденсаторы бар тұрақты ток буындары;
- IGBT транзисторларындағы автономды кернеу инверторлары (I1, I2).

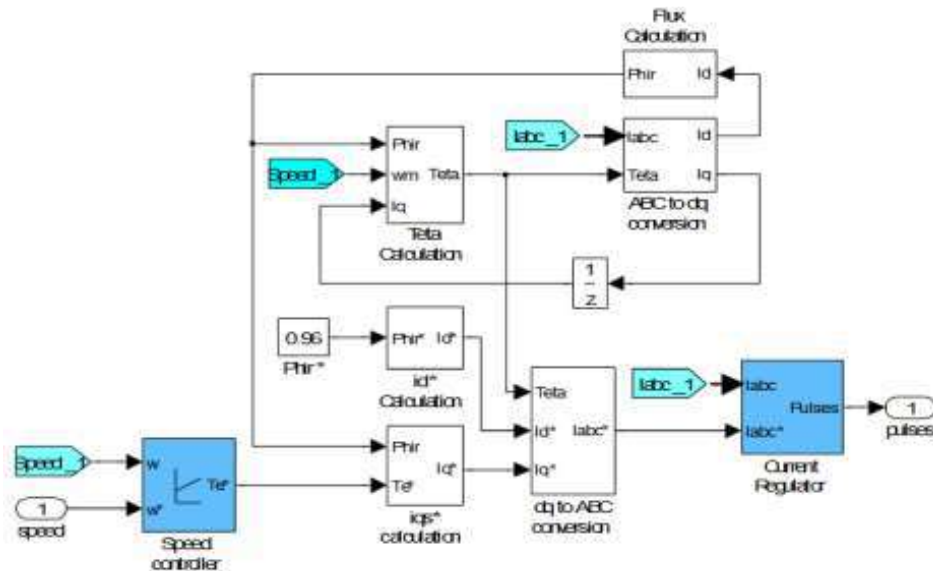
Бұл проблемада модель тұрақтылығының маңызды критерийі әртүрлі динамикалық бұзылуларға қарамастан M1, M2 роторларының айналуының синхрондылығы болып табылады (M1 және M2 жылдамдықтарының сәйкес келмеуіне әкелетін білікке қарсылық моментінің күрт өзгеруі).

3.10-суретке сәйкес жылдамдықты реттеу екі M1, M2 виртуалды асинхронды қозғалтқыштардың айналу синхрондығын ұстап тұру арқылы PLC блогымен қамтамасыз етіледі, онда M1 және M2 асинхронды электр қозғалтқыштарының білігіндегі ω_1 және ω_2 айналу жылдамдығының нақты мәндерін w_zad мәнімен салыстыру жүзеге асырылады және сигналдар ротордың ағынына жанама бағытталған векторлық басқару блоктарына (vc1, VC2 блоктары) беріледі, олардың шығысында I1 және I2 инверторларында ендік импульсті модуляция қалыптастыру үшін импульстар пайда болады.

Ротордың ағынына жанама бағытталған векторлық басқару жүйесі 3.11-суретте көрсетілген (Vector control блогы). Ол келесі блоктардан тұрады:

- P1 контроллері (speed controller), берілген жылдамдықтан нақты жылдамдық өзгерген кезде сигнал береді;
- IQ кіріс тогын санау блогы* ротордың нақты ағынына қатысты ағындарды қабылдау (I_{qs} * есептеу);

- қозғалтқыштың айналу моментін құру бойынша I_d^* анықтау тоғын есептеу блогы (I_d^* calculation);
- "dq to ABC" блогы айналмалы екі фазалы координаталар жүйесін үш фазалы қозғалмайтын жүйеге түрлендіреді;
- гистерезис тоғының реттегіші (ағымдағы реттегіш). Осы блоктың ашылатын параметрлері терезесінде "ағымдағы дәліздің" ені көрсетіледі. Фазалардағы ток сигналдары және фазалық a,b,c нақты токтардың кері байланыс сигналдары блоктың кірісіне түседі.



Сурет 3.11 - MATLAB-тағы VC блогының ішкі жүйесі

- қозғалмайтын үш фазалы координаттар жүйесін айналмалы екі фазалы координаттарға түрлендіретін "ABC to dq" блогы;
- ротордың (Φ_{ir}) ағынын анықтайтын блок.
- қозғалтқыштың негізгі ағынына қатысты ротордың ағуын есептеу блогы (flux Calculator блогы);
- инвертордың шығу жиілігін анықтайтын инвертордың шығу жиілігін анықтау блогы (Teta calculation), яғни екі фазалы координаталар жүйесінің қажетті айналу жылдамдығы.

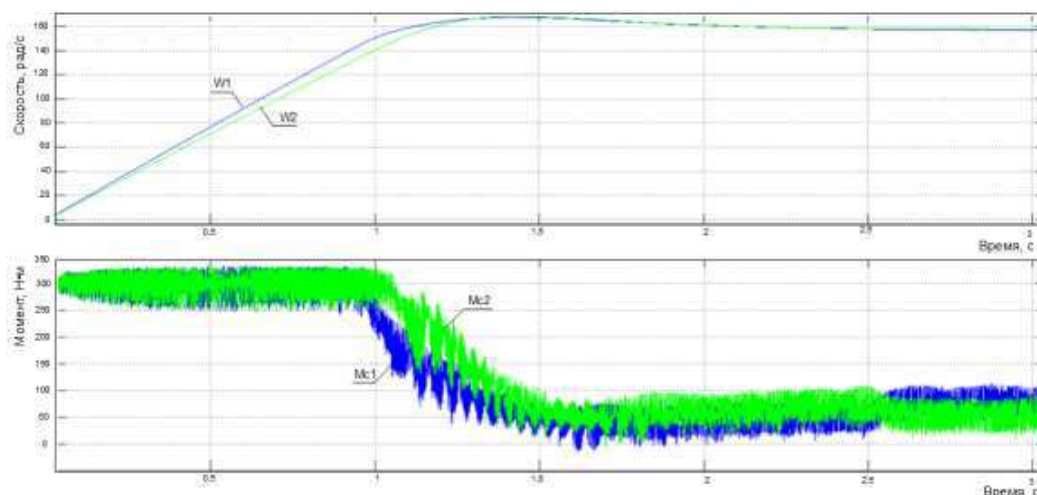
Бұл жүйенің функционалдығы ротордың айналу жылдамдығы (speed) және фазалық токтардың лездік мәндері (I_{abc}) бойынша кері байланыс сигналдарын өңдеу және салыстыру арқылы анықталады [15].

Екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің айналу жылдамдығы мен электромагниттік моментінің осциллограммалары 3.12-суретте көрсетілген.

Іске қосу сәтінде электр қозғалтқыштардың біліктеріндегі жүктеме әртүрлі болып табылады ($M_{c1}=38,16$ н·м, $M_{c2}=57,24$ н·м), бұл үдеу сәтінде 1,25 сек ұзақтығымен жылдамдық бойынша отыруды негіздейді. Содан кейін ω_1 және ω_2 жылдамдығы тең болатын тұрақты режим пайда болады.

Бұдан әрі, $t=2,5$ сек уақыт сәтінде жүктеменің күрт өзгеруі орын алады, онда M_1 бірінші қозғалтқышындағы момент күрт артады ($M_{c1}= 57,24$ н·м), ал

екінші қозғалтқыштағы момент M_2 күрт төмендейді ($M_{c2}=38,16$ н·м). Нәтижесінде (біркелкі емес жүктеме кезінде) тапсырма сигналдары PLC блогынан ($w_zad_1=157,2$ рад/с, $w_zad_2=156,8$ рад/с), әр электр жетегі үшін жеке, VC1 және VC2 векторлық блоктарына өзгереді. Нәтижесінде, осциллограммалар көрсеткендей, қозғалтқыштардың айналу жылдамдығы теңестіріледі ($w_1=156,8$ рад/с, $w_2=157$ рад/с).



3.12 сурет - екі қозғалтқышты электр жетегінің айналу жылдамдығы мен электромагниттік моментінің Осциллограммасы

Алынған өтпелі процестерден көріп отырғанымыздай, M1, M2 қозғалтқыштарының білігіне жүктеменің әртүрлі мәндерінде жиілік түрлендіргіштері бар екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің жүйесі келісілген айналуды қамтамасыз етеді.

Осылайша, айнымалылардың амплитудалық мәндерін және олардың векторлары арасындағы бұрыштарды реттеу арқылы статикада да, динамикада да АҚ-ны толық Басқару қамтамасыз етіледі, бұл өтпелі процестердің сапасын айтарлықтай жақсартады.

3.5 "ЖТ-АҚ" жүйесінің электр жетегі үшін басқару тәсілдерін салыстыру»

Қозғалыс механизмдерінің асинхронды қысқа тұйықталған электр қозғалтқыштарының жұмыс режимі мен жиілікті басқаруды таңдау негізінде оларды басқарудың оңтайлы тәсілдерін таңдау қарастырылады.

Жиілікті реттейтін электр жетегінде басқарудың бірнеше белгілі әдістері бар: скаляр (U/f реттеу), ротордың ағынына бағытталған векторлық және моментті тікелей басқару (rim). Жабық электр жетегін басқару жүйесіндегі скалярлық басқару әдісі немесе U/f реттеу, қолдану кеңірек және іске асыру оңай. Оның принципі қозғалтқыш статорындағы кернеу мен жиілік арасындағы тұрақты қатынасты сақтауға негізделген ($U/f = const$). Реттеу кезінде кернеу мен ток скалярлық шамалар ретінде қарастырылады, яғни. осы шамалардың

модульдері қолданылады. Реттеу әдісі ауыстыру схемасына (2.2-Б сурет) және скалярлық шамалардағы электромагниттік момент үшін өрнекке негізделген [16].

Жиілік пен кернеу бірге реттелетін екі басқару әсері ретінде әрекет етеді. Бұл жағдайда жиілік тәуелсіз әсер ету ретінде қабылданады, ал осы жиіліктегі кернеудің мәні жиілік өзгерген кезде жетектің механикалық сипаттамаларының түрі қалай өзгеруі керек, яғни ең алдымен жиілікке байланысты критикалық момент қалай өзгеруі керек.

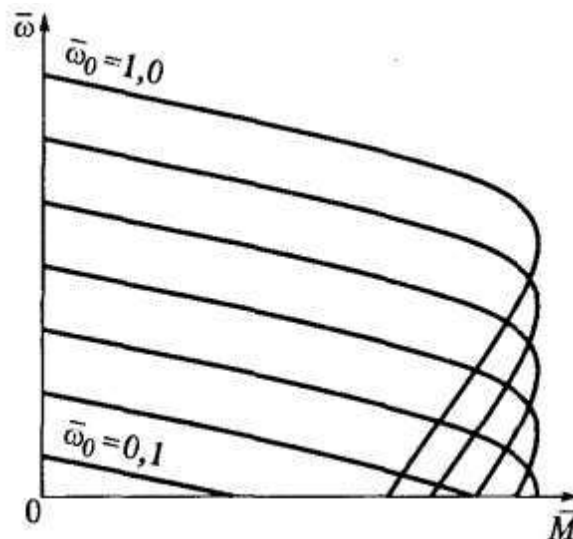
Шағын және орта қуатты қозғалтқыштарды U/f реттеу кезінде статор орамасының белсенді кедергісі ескеріледі, бұл $i1r1$ кернеуінің төмендеуіне және шығудағы E_a кернеуінің төмендеуіне әкеледі. Статор орамасынан кейін кернеу деңгейін сақтау үшін IR өтемақысы қолданылады. Өтемақы принципі статор орамасының кернеуін арттыруға негізделген.

Қозғалтқыштың моменті статор орамасындағы кернеудің төмендеуін ескере отырып анықталады:

$$M_D = 3 \frac{p_1 k_1^2}{\omega_{0el.n}} \cdot \frac{R_2 / \bar{\omega}_p}{(R_2 / \bar{\omega}_p)^2 + (\sigma x_2)^2} \left(\frac{E_a}{\bar{\omega}_0} \right)^2 \quad (3.20)$$

Нәтижесінде қозғалтқыштың тиеу қабілетінің тұрақтылығын сақтау үшін тиісті қатынасты орындау қажет [16]:

$$\frac{E_a}{\bar{\omega}_0} = const$$



Сурет 3.13 - $E_a / \bar{\omega}_0 = const$ басқару заңы бойынша асинхронды қозғалтқышы бар электр жетегінің механикалық сипаттам

Жылдамдықты дәл реттеу үшін электр жетектерін басқарудың жабық жүйелері қолданылады. Олар жылдамдық бойынша кері байланысты енгізуде және тиісті реттегішті пайдалануда көрінеді. Мұндай жүйелер бағыныңқы реттеумен және дәйекті түзетумен басқаша аталады. Осы жорамалды енгізу

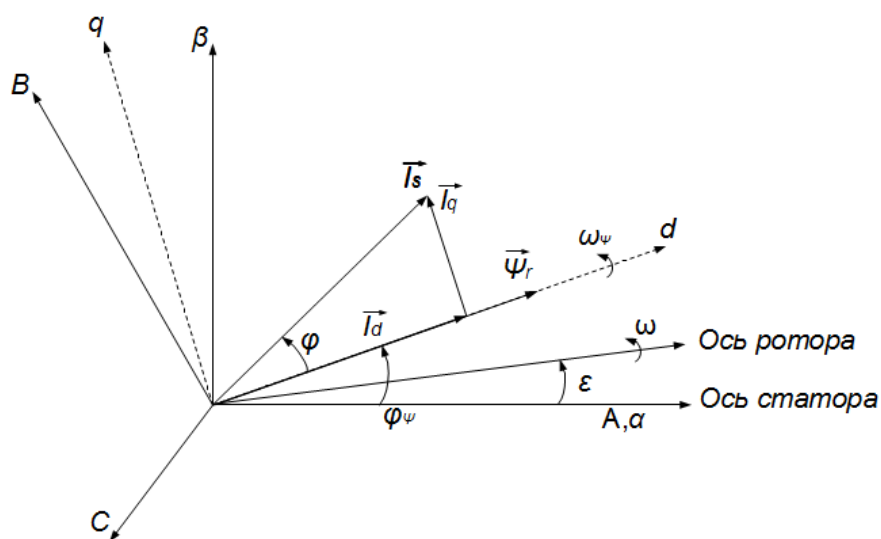
нәтижесінде скалярлық жиілікті реттеу кезінде диапазон 200-ге дейін, ал моменттен 1,5 Мн-ге дейін асқан кезде жылдамдықты берілген деңгейде ұстап тұру артады.

Бұдан шығатыны, скалярлық басқару заңы бойынша жылдамдықты реттеу электр жетектерінде кеңінен қолданылады, мұнда салыстырмалы түрде төмен реттеу диапазоны мен қатаң динамикалық сипаттамалар қажет емес.[16].

Неғұрлым қатаң және жылдам жұмыс істейтін электр жетектері үшін векторлық басқару заңдары кеңінен қолданылады. Олардың дамуына Микропроцессорлық техниканың дамуы және оларды өнеркәсіпке енгізу ықпал етті.

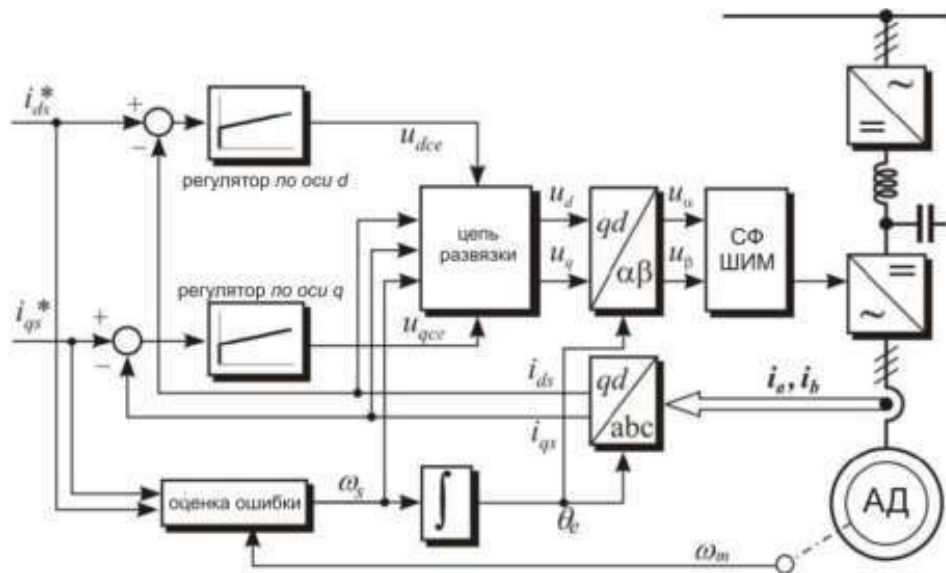
Векторлық басқару заңы айнымалылардың лездік мәндеріне сәйкес жүзеге асырылады. Векторлық айнымалыларды полярлық немесе декарттық координаттар жүйесінде бір-біріне қатысты бағдарлау принципі жүзеге асырылады. 3.15-суретте қозғалтқыш роторының ағындық векторының бағыты мен бұрыштық орнын анықтауға негізделген принцип көрсетілген, онда D және q ортогональды осьтер d осі ротордың ағындық векторының бағытына сәйкес келеді. Қозғалтқыш статорының кернеу векторы d, q осьтерінде реттеледі, d осі бойынша кернеудің компоненті d осі бойынша статор тогының мөлшерін реттейді. D осі бойымен статор тогын өзгерту арқылы ротордың ағу векторының амплитудасының қажетті мәніне қол жеткізу керек. Осы ось бойынша кернеумен басқарылатын q осі бойынша статор тогы қозғалтқыш жасаған сәтті анықтайды. Бағдарлау динамикалық және статикалық жетек режимдерінде момент пен ағындарды бөлек (тәуелсіз) басқаруды қамтамасыз етеді [17].

Ақ айнымалы векторларының ағымдағы мәндері мен кеңістіктік жағдайы туралы ақпаратты оларды тікелей өлшеу арқылы, тиісті датчиктер (Холл датчигі) арқылы да, жанама түрде АҚ математикалық моделі негізінде де алуға болады. Микропроцессорлық технология негізінде жасалған жиілікті реттейтін электр жетектерінде математикалық модель негізінде векторлар туралы ақпарат алуға мүмкіндік беретін жанама өлшеу әдісі бар векторлық басқару кеңінен қолданылды [14].



Сурет 3.15 - Ротордың ағынына бағытталған векторлық диаграмма

Көп жағдайда векторды Басқару жүйелерінде айнымалы мәндерді ротордың Ψ_r ағынына бағыттау принципі қолданылады. Ол үшін qd/ABC және $qd/\alpha\beta$ блоктарында Парк - Горевтің күрделі түрлендірулері жүзеге асырылады: қозғалмалы координаттар жүйесінен қозғалмайтын жүйеге, содан кейін басқаруды екі тізбекке бөлу. 3.16-суреттегі функционалдық схемаға сәйкес, бірінші тізбекте i_{qs} тогы басқарылады, бұл қозғалтқыштың ағынын момент пен айналу жылдамдығына қарамастан басқаруға мүмкіндік береді, ал екінші тізбекте - моментті басқару үшін i_{qs} тогы. Сондай-ақ, d және q осьтерінің реттегіштері ағын мен момент параметрлерінің берілген параметрлерге бағынуын басқару үшін енгізіледі. Басқарудағы векторлық жүйенің сенімділігін ескере отырып, осы жүйенің бірқатар кемшіліктерін байқамау мүмкін емес. Олар сыртқы жылдамдық реттегішінің жылдамдығын бәсеңдететін күрделі динамикасы бар ішкі ток тізбектерінің болуымен, координаталық түрлендіргіштер мен ендік-импульстік момент түйінінің болуымен көрінеді. Сондықтан, жүйе өте күрделі.



3.16-сурет - Вектормен басқарылатын жүйенің функционалдық схемасы

Ротордың ағынын басқарудың векторлық жүйелеріне балама тікелей моментті басқару жүйесі (МТБ) болып табылады. Бұл жүйеде моментті басқару статор ағынының берілуіне әсер ету арқылы жүзеге асырылады Ψ_s , векторлық жүйеде басқару ретінде i_{qs} -ге әсер ету арқылы жүзеге асырылады. 3.21 өрнегінен, егер \tilde{U}_1 статорындағы кернеудің кеңістіктік векторына әсер ету статор ағынының беріліс Модулінің тұрақтылығын сақтаса, онда қозғалтқыштың электромагниттік моментін бұрыш қаншалықты тез өзгерсе, соншалықты тез өзгертуге болатындығын көруге болады.

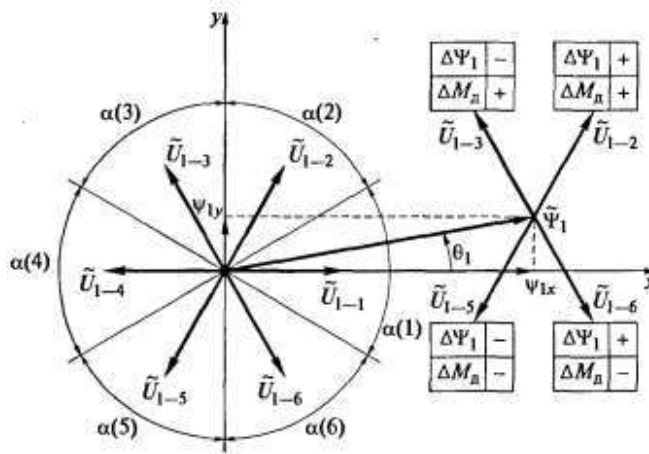
$$M_D = \frac{3}{2} \rho_{II} \frac{k_1}{\sigma L_2} |\psi_s| |\psi_r| \sin \theta \quad (3.22)$$

мұндағы θ - статор мен ротор ағындарының векторлары арасындағы бұрыш, $\theta = \theta_1 - \theta_2$

ψ_s, ψ_r - статор мен ротордың ағытпасы.

Бұл өрнектен МТБ жүйесінде электромагниттік моменттің бақылау әсеріне жылдам реакциясы бар екенін көруге болады.

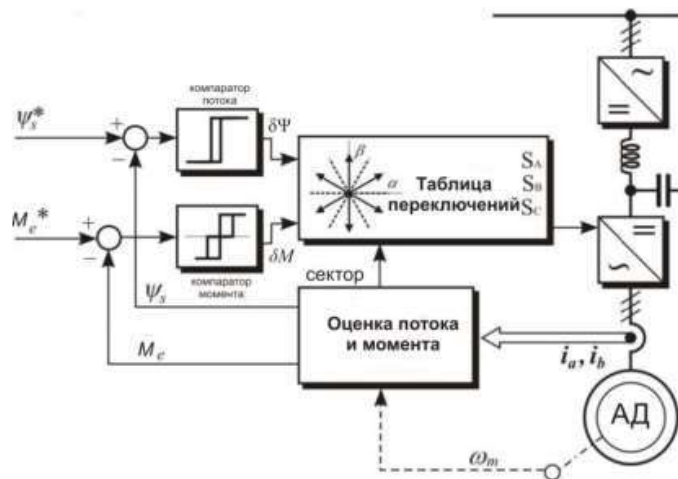
МТБ жүйесіндегі ағындарды басқаруға кернеу инверторындағы кілттердің тиісті ауысуы арқылы қол жеткізіледі. Оның принципі кез – келген уақытта қозғалтқыштың моменті мен ағымының мәніне байланысты әрқайсысы 60 электр градус жазықтықтың алты секторының біріне (α_1 - α_6) кернеу векторын анықтауға негізделген (3.17-сурет). Мысалы, егер белгілі бір уақытта Вектор модулі үлкен болса және электромагниттік момент аз болса, онда α_3 секторына сәйкес МТБ жүйесі кернеу векторына бейімделеді, нәтижесінде беріліс азаяды, ал электромагниттік момент артады.



3.17-сурет - Инвертор кілттерінің ауысу ағынына және қозғалтқыш моментіне әсерін бағалау.

Асинхронды қозғалтқыштың векторлық жылдамдықты басқару жүйесінен айырмашылығы, рпм жүйесінде тұрақты жиіліктегі МБТ модуляциясы жоқ, сондықтан координаталық түрлендіру қажет емес.

3.18-суретке сәйкес, АИН жиілік түрлендіргішінің кернеу инверторындағы кілттерді ауыстыру ағындық вектордың модулі мен электромагниттік моменттің нақты мәндерінің олардың берілген мәндерінен ауытқуына байланысты жүзеге асырылады. Инвертор кілттерін қажетті ауыстыруды таңдау оңтайлы ауыстыру кестесіне сәйкес жүзеге асырылады. Кесте үшін кіріс мәндері-бұл модельде берілген және есептелген шамалардың айырмашылығы әсер ететін ағын мен момент компараторларының шығыс сигналдары.



Сурет 3.18 - МТБ жүйесінің функционалдық схемасы

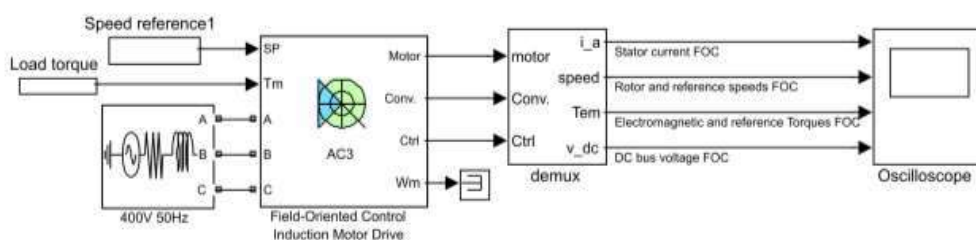
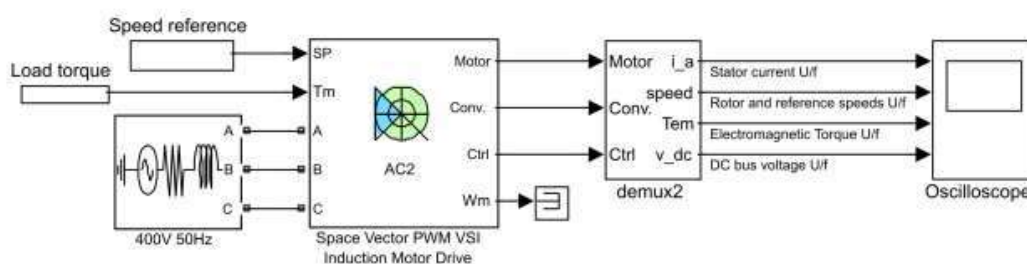
Ағын компараторының шығыс сигналы 1 немесе 0 мәндерін қабылдай алады. Егер статор ағымының ағымдағы мәні вектордың Модулінің берілген мәнінен рұқсат етілген ауытқудан асатын мәннен аз болса , онда оны көбейту

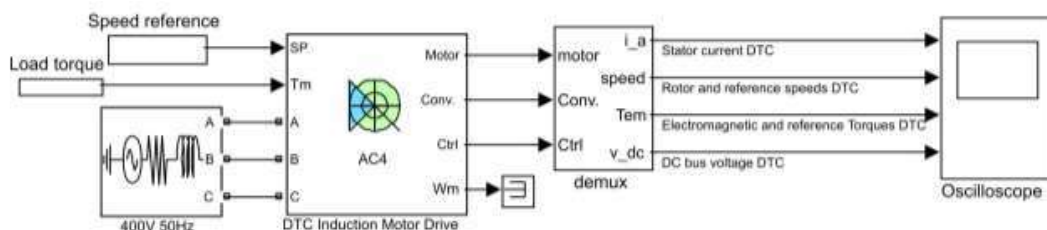
керек, ол компаратордың шығыс сигналына сәйкес келеді, егер ол берілген мәннен үлкен мәннен асып кетсе, бұл ағындарды азайту қажеттілігін білдіреді. Момент компараторының шығысы моменттің үш түрлі мәнін қабылдай алады: 1, -1 және 0. Мән қозғалтқыш моментінің ұлғаюын қажет ететін күйге сәйкес келеді, мәні момент азайтылуы керек, мәні моменттің рұқсат етілген шектерде болатындығын білдіреді.

МТБ ұйымдастыру үшін статор ағыны мен қозғалтқыш моментінің ағымдағы мәндері болуы керек. Бұл мәндер инвертордың шығысындағы ток және кернеу мәндеріне негізделген қозғалтқыш моделінде есептеледі. Сонымен қатар, қазіргі уақытта статор ағынының векторы орналасқан сектор нөмірі оңтайлы коммутация кестесіне енгізіледі. Оның анықтамасы модельде де жасалады[16].

Жоғарыда қарастырылған басқару әдістерінің негізінде MATLAB R2010a бағдарламасында компьютерлік модельдер енгізіліп, суретте көрсетілген. 3.19-суретке сәйкес арнайы блоктар бар: AC2 (space vector МТБ VSI induction motor drive) – U/f реттеуді жүзеге асырады, AC3 (field-oriented control induction motor drive)- ротордың ағынына тікелей бағытталған векторлық басқаруды жүзеге асырады, AC4 (Direct torque control induction motor drive) – тікелей моментті басқаруды жүзеге асырады. Бұл блоктар SimPower Systems арнайы кітапханасында орналасқан. Бұл блоктардың ішінде белгілі бір басқару заңдары бар асинхронды электр жетегінің жабық бір қозғалтқышты басқару жүйелері бар.

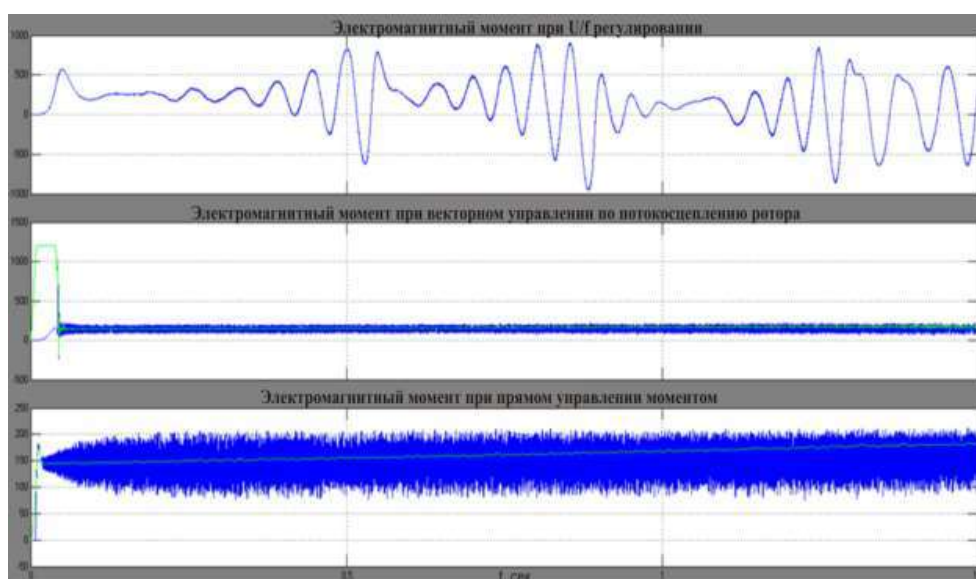
Бұл бағдарлама қисықтарды талдау нәтижесінде тіректі кранның қозғалыс механизмдерін басқарудың қолайлы әдісін анықтауға мүмкіндік береді.



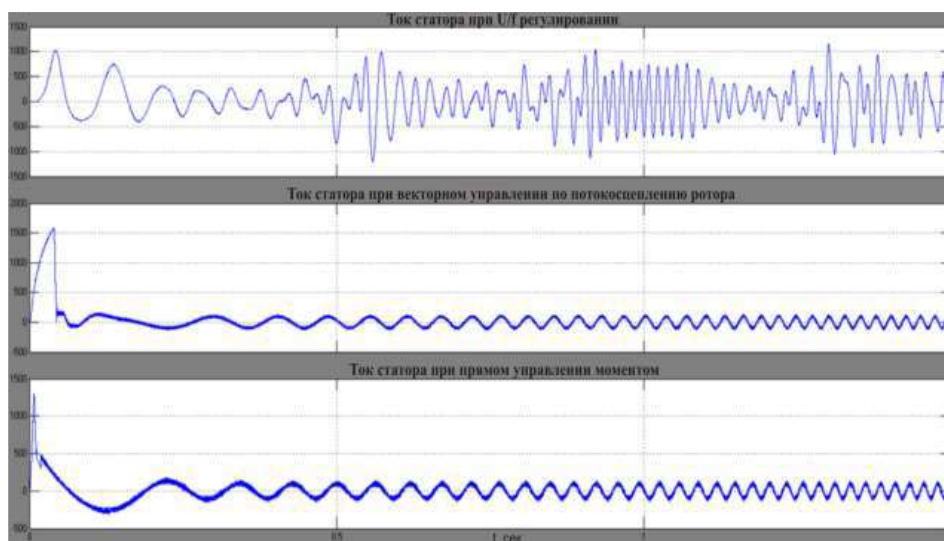


3.19 сурет - Басқарудың әртүрлі заңдары бар тұйық бір қозғалтқышты жүйенің компьютерлік модельдері: А) U / f реттеу; б) ағынмен ағыту бойынша тікелей бағыты бар векторлық; в) моментті тікелей басқару

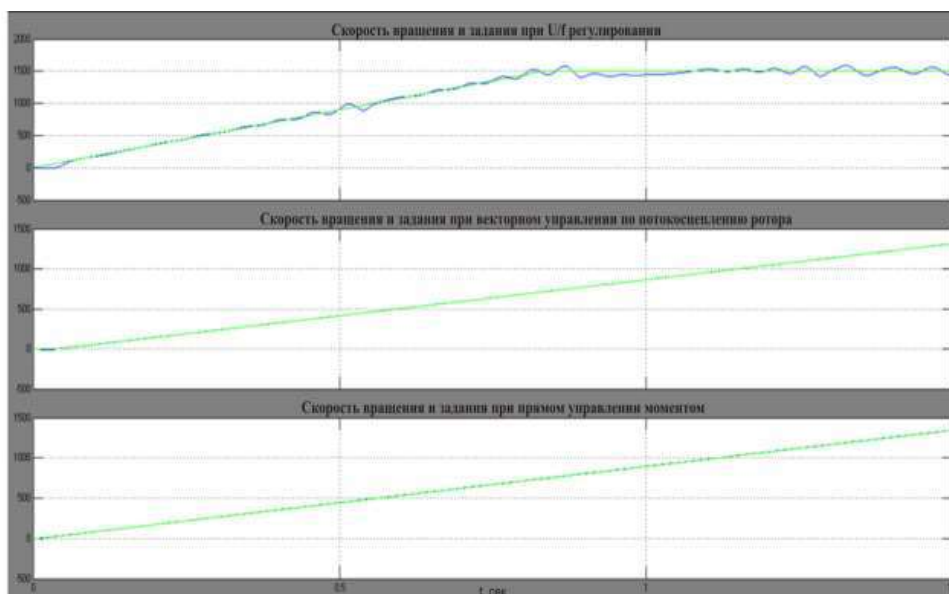
Суретте компьютерлік модельдерді модельдеу нәтижелері көрсетілген. Осциллограмма деректері басқарудың әрбір тәсілінің жұмыс ерекшелігін жеке-жеке толық көрсетеді. Берілген қисықтардың мәндері салыстырмалы, бірақ электр жетектерінің жұмысындағы нақты процестерді толығымен көрсетеді. Салыстырылатын жүйелердің жұмыс істеу тиімділігін бағалау үшін іске қосу режимдері белгілі бір жылдамдату қарқынымен және 1,5 секунд аралықпен номиналды жүктемемен берілген. 3.20-суретке сәйкес, электромагниттік моменттің тұрақтылығы аз тұрақты (салыстырмалы түрде үлкен тербелісі бар) U/f реттеу моментінің қалыптасуын қоспағанда, векторлық басқару және rim жүйелерінде байқалады. Егер біз тұрақты сәттері бар екі жүйені ескеретін болсақ, онда есептеу құрылымының күрделілігіне байланысты векторды басқаратын жүйенің кешігуі тән екенін анықтауға болады. Осы себепті, 3.22-суретке сәйкес, жылдамдықтың кешігуі де байқалады. 3.21-суретте МТБ Бар жүйенің үдеу кезіндегі іске қосу токтары векторлық жүйеге және U/f -қа қарағанда ең кіші болып табылатыны көрсетілген. Бұл көрсеткіш жоғары температуралық режимдердің болуына мүмкіндік беретін кран механизмдері үшін маңызды.



3.20 сурет - Жиілік реттелетін электр жетегіндегі әртүрлі басқару әдістерімен электромагниттік моментті қалыптастыру



3.21 сурет - Жиіліктегі реттелетін электр жетегіндегі әртүрлі басқару әдістерімен токтарды қалыптастыру



3.22 сурет - жиілік реттелетін электр жетегінде басқарудың әртүрлі тәсілдерімен айналу жылдамдығын қалыптастыру

Осылайша, үш басқару жүйесін зерттеу кезінде рип жүйесіне артықшылық беріледі. Бұл жүйе айтарлықтай пульсацияға қарамастан моменттің қалыптасуында тезірек әрекет етеді, бұл кран механизмдерінің электр жетектері үшін маңызды критерий болып табылады. Рип жүйесі векторлық жүйемен салыстырғанда қарапайым. Сонымен қатар, онда тұрақты жиілігі бар МТБ модуляциясы жоқ.

4 "ЖТ-АҚ " жүйесі үшін ешкі кранының қозғалу механизмінің моментін тікелей басқаруды зерттеу

4.1 асинхронды қозғалтқыштың математикалық сипаттамасын таңдау

Асинхронды қозғалтқыш моделі басқарудың заманауи әдістерін жасау және зерттеу кезінде статикалық және динамикалық сипаттамаларды талдау үшін қолданылады. Әдетте, қан қысымын зерттеуде бірқатар жасанды әдістер мен болжамдар қолданылады. Негізгі әдіс-асинхронды қозғалтқышты жалпыланған электр машинасы түрінде ұсыну.

Тиісінше, МТБ-ның қасиеттерін қарастыру барысында үш фазалы шамалармен жұмыс істеу азайтылады. Егер сіз тұрақты ток қозғалтқышын басқарудың жеңілдігін тағы бір рет еске түсірсеңіз, мұндай шешімнің дұрыстығы айқын болады, атап айтқанда жалпыланған электр машинасының теориясын қолдану реті жүйесіне жақындайды. АҚ моделі координаталардың үш фазалы-екі фазалы түрленуіне, яғни нақты қозғалтқыштың үш фазалы шамаларынан осьтердегі айнымалыларға (q,d) ауысуына негізделген. Тиісінше, үш фазалы мандерге кері ауысу жүзеге асырылуы керек. АҚ моделін нақты электр машинасына жақындату әртүрлі дәлдікпен жүзеге асырылуы мүмкін, бұл көбінесе компьютерлік машинаның есептеу мүмкіндіктерімен және белгілі бір нақтылаудың орындылығымен анықталады. Бұл жағдайда қозғалтқыш моделін де, электр жетегінің басқа элементтерін де нақтылауға болады: автономды инвертор, механикалық бөлік, датчиктер және тікелей моментті басқару алгоритмдері бар басқару жүйесінің өзі (МТБ). Жалпыланған электр машинасы деп аталатын әмбебап векторлық-матрицалық математикалық модельдің дамуы 20-жылдардың соңында басталып, XX ғасырдың 40-жылдарының соңында аяқталды. Бұл модель сызықтық алгебра аппаратын қолдана отырып, идеализацияланған электр машинасындағы электромагниттік процестерді сипаттауға мүмкіндік береді. Модель кез-келген электр машинасын белгілі бір дәлдікпен еліктей алады. Бұл мәлімдеме статордың N фазалық орамасы және ротордың m фазалық орамасы бар электр машинасын екі фазалы модельге келтіру мүмкіндігіне негізделген. Мысалы, статор орамалары 90° фазада ығыстырылған айнымалы синусоидалы токтың екі көзінен қоректенгенде, жұмыс саңылауында дөңгелек айналмалы магнит өрісі пайда болады. Егер ротор орамаларының бірі тұрақты ток көзіне қосылса, синхронды машинаның моделі алынады. Егер ротордың екі орамасы да қысқа тұйықталса, онда асинхронды торлы машинаның моделі пайда болады, ал ротор орамаларында $f_2 = f_1 - s$ жиілігі бар токтар пайда болады (мұндағы s - асинхронды қозғалтқыштың сырғуы). Егер сіз жалпыланған машинаның орамаларының біріне ауыспалы кернеу беріп, роторды баяулатсаңыз ($\omega = 0$), онда сіз трансформатор моделін ала аласыз. Соңында, егер статор орамаларының бірі тұрақты ток көзіне қосылса және ротор орамалары ротордың айналу жиілігіне тең жиіліктегі екі айнымалы синусоидалы ток көзіне және 90° фазалық ығысуға

қосылса, ротор өрісі оның білігінің айналу бағытына қарама-қарсы бағытта айналады, онда біз тұрақты ток машинасының моделін аламыз. Бұл модельде ротор өрісі басқарылатын жиілігі бар айнымалы ток көздерімен қалыптасады, оның нақты машинадағы рөлін тұрақты ток көзі мен коллектор атқарады. Біздің жағдайда торлы роторы бар асинхронды қозғалтқышты қарастыру қызығушылық тудырады.

Жалпыланған электр машинасын қарастырған кезде төменде көрсетілген белгілі бір ережелерден туындайды:

- электрлік кеңістіктік бұрыш ротордың механикалық айналу бұрышының полюстер жұптарының санына көбейтіндісі ретінде анықталады;

- әрбір полюсте статор мен ротордағы екі фазалық аймақ сәйкес келеді, бұл ретте ток тығыздығының синусоидальды таралуы болжанады;

- статор мен ротордың фазалық аймақтары кеңістікте 90 электр градусқа жылжиды;

- статордың магнит өрісі мезгіл-мезгіл қайталанатын біркелкі емес, ротордың магнит өрісі біркелкі;

- ораманың ойықтарға орналасуы ескерілмейді, яғни ойықтардың магнит өрісінің таралу көрінісіне әсері;

- ауа саңылауы біркелкі қабылданады, егер айқын полюсті машина зерттелсе, гармоникалық компонентті енгізу арқылы біркелкілік ескерілуі мүмкін;

- статордың фазалық аймақтарының контактілері кеңістікте қозғалмайды, ротордың фазалық аймақтарының контактілері роторға қатысты қозғалмайды;

- статордың фазалық аймақтары бірдей деп есептеледі, ротордың фазалық аймақтарына ұқсас мәлімдеме;

- магниттеу қисығының сызықты еместігіне назар аудармайды;

- машинада электростатикалық өрістің болуы жоққа шығарылады, осылайша электр машинасының ішіндегі сыйымдылықтардың болуы ескерілмейді [20].

Жоғарыда келтірілген тұжырымдар жалпыланған электр машинасындағы процестерді есептеуді айтарлықтай жеңілдетеді, бірақ сонымен бірге дәлдікті төмендетеді.

Негізгі кемшіліктердің бірі машина моделіндегі болатты магниттеу қисығының сызықтығы деп санауға болады. Әдетте, нақты машиналарда жұмыс нүктесі магниттеу сипаттамасының сызықты емес бөлігінің басында таңдалады және жұмыс барысында, әсіресе динамикалық режимдерде, терең қанықтыру жағына ауыса алады, бұл өзіндік, өзара шашырау индуктивтілігінің өзгеруіне әкеледі. Сонымен қатар, динамика әр түрлі сипатқа ие болады, негізінен өтпелі уақыт азаяды, сондықтан индуктивтіліктің тиісті функцияларын енгізе отырып, магниттеу қисығының сызықты емес екендігін ескерген жөн.

Белсенді қарсылықтың өзгеруін елемей де үлкен қателік береді. Короторлы роторы бар асинхронды қозғалтқышқа қатысты орамалардың белсенді кедергісінің айнымалы мәні олардың температурасының өзгеруіне және токтың

ығысу әсеріне байланысты болуы мүмкін, сонымен қатар электромагниттік өтпелі процестердің жүру уақытын ескере отырып, бірінші факторды елемеуге болады. Айта кету керек, электр машинасының ойықтарындағы токтың ығысуы кезінде индуктивті шашырау кедергісі де өзгереді [20].

Қарастырылып отырған әсердің нәтижесінде қозғалтқышты іске қосу уақыты негізінен азаяды.

Нақты электр машинасындағы процестерге ауа саңылауында магнит өрісінің жоғары гармоникаларының болуы үлкен әсер етеді. Бұл дизайн ерекшеліктері мен сыртқы әсерлерден туындаған синусоидальды өрістің бұрмалануы болуы мүмкін. Бірінші жатқызуға болады тиімсіз орналастыру орама тудыратын жақындату нысанын магнитодвижущей күш МДС қарай тікбұрыш немесе саңылаудың әсері бөлу магнит өрісі. Сонымен қатар, жоғары гармоника Болаттың магниттелу қисығының сызықты емес болуына байланысты көрінуі мүмкін. Өрістің синусоидальды еместігін тудыруы мүмкін сыртқы әсерлер: синусоидальды емес қоректену кернеуі, механикалық моменттің соққы өзгерісі, тұрақты уақыттың үлкен болуына байланысты жылу соққысы аз әсер етеді. Жалпыланған машинада шын мәнінде бар құйынды токтар ескерілмейді. Олар ротордағы жоғары ток жиіліктерінде ерекше әсер етеді.

Алайда, жалпыланған электр машинасын қолдану жоғары динамикалық АҚ басқару жүйелерін зерттеуде өзін дәлелдеді, бұл машинаның электромагниттік моменттерін қалыптастыру процестерінің физикалық мәнін көрнекі түрде көрсетуге мүмкіндік берді [20].

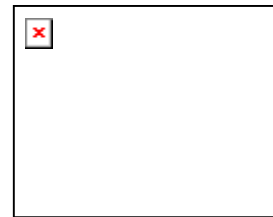
4.2 МТБ жүйелеріне арналған асинхронды қозғалтқыштың математикалық моделі

МТБ жүйесі үшін реттеу объектісі асинхронды электр қозғалтқышы болып табылатыны белгілі. Сондықтан, бұл жүйе үшін математикалық модельді құрылымдық схемалардың қолданыстағы банкіне жабу үшін қозғалтқыштың қолайлы математикалық моделін ұсыну қажет.

Асинхронды қозғалтқыштың математикалық моделі белгілі математикалық сипаттамаға негізделген [20]. Лаплас түрлендірулеріндегі асинхронды қозғалтқыштың электромагниттік тепе-теңдік теңдеулер жүйесін келесідей жазуға болады:

$$\begin{cases} v_{s1} = \frac{1}{p}(U_{s1} - R_s i_{s1}) \\ v_{s2} = \frac{1}{p}(U_{s2} - R_s i_{s2}) \\ v_{r1} = \frac{1}{p}(-R_r i_{r1} - \sigma_{11} p v_{s1}) \\ v_{r2} = \frac{1}{p}(-R_r i_{r2} + \sigma_{11} p v_{r1}) \end{cases} \quad (4.1)$$

Алайда, мәселені шешкен кезде асинхронды қозғалтқыштың толық моделін қолдану қажет емес. Жүйесінде ПУМ басқармасы бойынша ғана жүргізіледі статорным құрайтын кернеу, ток және потокосцепления, демек, қозғалтқыштың моделі, сондай-ақ мақсатқа сай орындауды статорных координаттары. (4.1) Роторлық айнымалылардың теңдеулерін бастапқы жүйеден шығару үшін құраушы Токтар мен қозғалтқыш ағындарының байланыс теңдеулерін пайдалану қажет. Белгілі болғандай [11], бұл айнымалылар келесідей байланысты:



(4.2)

Теңдеулер жүйесін (4.2) қолдана отырып, ротор ағынының компоненттерін ток және статор ағынының компоненттері арқылы білдіруге болады. Бұл теңдеулерді статор тогы мен ағымының компоненттері арқылы ротор тогының құрамдас бөліктерінің өрнектерімен толықтыру қажет. Байланыс теңдеулерінің бүкіл жүйесі келесідей:

$$\begin{cases} i_{r1} = \frac{1}{L_r}(v_{r1} - L_s i_{s1}) \\ i_{r2} = \frac{1}{L_r}(v_{r2} - L_s i_{s2}) \\ v_{s1} = \frac{L_s}{L_r}(v_{r1} - \sigma L_s i_{s1}) \\ v_{s2} = \frac{L_s}{L_r}(v_{r2} - \sigma L_s i_{s2}) \end{cases} \quad (4.3)$$

Қозғалтқыштың статор тогының құрамдас бөліктерінің келтірілген теңдеулер жүйесі өрнектерді (4.3) теңдеулер жүйесіне (4.1) ауыстыру арқылы алынады):

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{(T_r p + 1)}{L_s (\sigma T_r p + 1)} \psi_{s\alpha} + \frac{T_r}{L_s (\sigma T_r p + 1)} (\psi_{s\beta} - \sigma L_s i_{s\beta}) \cdot \omega_r p \\ i_{s\beta} &= \frac{(T_r p + 1)}{L_s (\sigma T_r p + 1)} \psi_{s\beta} - \frac{T_r}{L_s (\sigma T_r p + 1)} (\psi_{s\alpha} - \sigma L_s i_{s\alpha}) \cdot \omega_r p \end{aligned} \quad (4.4)$$

мұндағы $T_r = L_r / R_r'$ - айналмалы тізбектің электромагниттік уақыт тұрақтысы.

Қозғалтқыштың электромеханикалық тепе-теңдік теңдеулеріне электромагниттік моменттің өрнегі және электр жетегінің негізгі қозғалыс теңдеуі кіреді [20]. Бұл теңдеулер жүйесі келесідей:

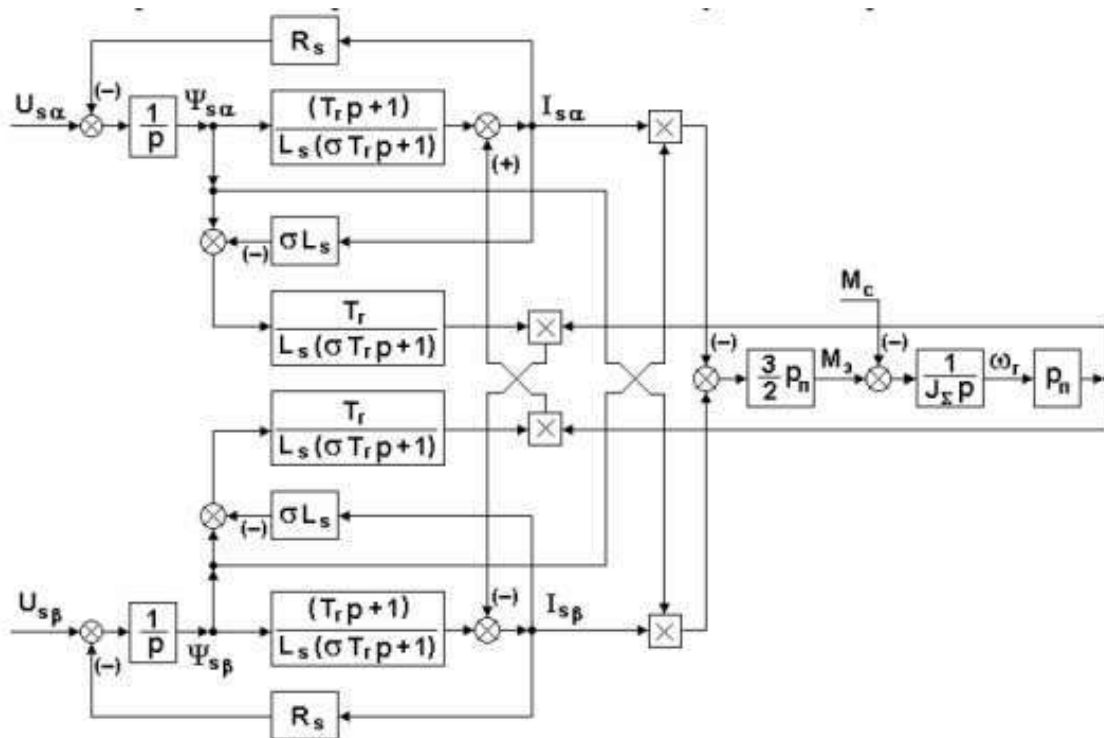
$$\begin{cases} M_D = \frac{3}{2} p_{\Pi} (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \\ \omega_r = \frac{1}{J_{\Sigma} p} (M_D - M_c) \end{cases} \quad (4.5)$$

мұндағы J_{Σ} - қозғалтқыш білігіне келтірілген ротордың инерция моменті мен тірек қранының қозғалыс механизмі;

M_c - сыртқы бұзушы әсер (механизмнің статикалық қарсылық моменті).

(4.4) және (4.5) теңдеулер жүйелеріне сәйкес статор координаттарында асинхронды қозғалтқыштың құрылымдық схемасы жасалды.

Схема 4.1-суретте көрсетілген және келесідей:



4.1 сурет - Статор координаттарындағы асинхронды қозғалтқыштың құрылымдық схемасы

Осы құрылымдық тізбектегі барлық айнымалылар қозғалтқыштың статор тізбегіне жатады. МТБ жүйесін құру үшін $i_{s\alpha}$ және $i_{s\beta}$ статор тогының компоненттерінің ағымдағы мәндері туралы ақпарат қолданылады, сондай-ақ егер айналу жиілігін тікелей көрсететін жүйе қарастырылса, оғ қозғалтқыш роторының айналу жиілігі туралы сигнал пайдаланылуы мүмкін. Ауыстырмайтын жүйелерде бұл сигнал қолданылмайды.

4.3 айнымалы ток электржетегінің МТБ принципіннің алгоритмі

Индукциялық қозғалтқыштың моментін тікелей басқару әдісі тиісті статор кернеуінің векторын таңдау арқылы статор ағыны мен электр қозғалтқышының электромагниттік моментін тікелей басқаруға мүмкіндік береді [21]. Әдістің негізгі пайдалану артықшылықтары:

- статор ағынын және электр қозғалтқышының электромагниттік моментін тікелей басқару;
- статор тогы мен кернеуін жанама басқару;
- синусоидальге жақын статор токтары мен ағындарының пішінін қамтамасыз ету;
- электр жетегінің жоғары динамикалық сипаттамалары, оның ішінде төмен жиіліктер аймағында, жүйенің минималды жауап беру уақыты, соның ішінде классикалық векторлық басқару жүйелерімен салыстырғанда. Техникалық іске асыру тұрғысынан артықшылықтардың арасында мыналарды атап өту керек:

- координаталық түрлендірулердің болмауы;
- ағынның және моменттің реттелетін шамаларының ішкі PID реттегіштерін қолдану қажеттілігінің болмауы. Дегенмен, классикалық тікелей моментті басқару жүйесі бұрын белгіленген бірқатар кемшіліктерге ие:
 - электромагниттік моментті, статор ағынының кеңістіктік векторының мәні мен бұрыштық орналасуын бағалау қажеттілігі, төмен жылдамдық аймағында электр қозғалтқышын іске қосу кезінде параметрлерді дәл бағалау жеткіліксіз;
 - момент пен ағынның мәндерінің тән біркелкі еместігі;
 - жүйені жылдам емес жылдамдықта жабу үшін қозғалтқыш білігінің ағымдағы жылдамдығын бағалау қажеттілігі.

Тікелей моментпен басқарылатын асинхронды электр жетектерінің жұмыс ерекшеліктерін зерттеу басқару принципі туралы нақты идеяны, басқару жүйесінің заманауи микропроцессорлық іске асырылуының ерекшеліктерін, сондай-ақ қуат инверторы мен электр машинасының ерекшеліктерін ескеруі керек күрделі математикалық модельді құруды талап етеді.

(4.5) өрнегіне сәйкес электр қозғалтқышының электромагниттік моменті магнит өрісінің векторлары мен статор токтарының мәні мен өзара орналасуымен анықталады [81]:

$$M_e = \frac{3}{2} p \bar{\psi}_s \cdot \bar{i}_s \quad (4.5)$$

Ағындық векторлардың векторлық көбейтіндісінен шамалардың скалярлық өрнегіне ауыса отырып, жоғарыдағы формуланы келесі түрде жазу керек:



(4.6)

мұндағы α_s - тұрақты координаталар жүйесінің α түзу осіне қатысты статор ток векторының айналу бұрышы;

ρ_s - бекітілген координаттар жүйесінің α түзу осіне қатысты статор шашырауының ағу векторының айналу бұрышы.

Моментті тікелей басқару әдісі статор ағынының классикалық векторлық басқаруына ұқсас физикалық принциптерге негізделген-егер сіз статор ағынының векторының мәнін тұрақты ұстасаңыз және статор ағынының векторының бұрыштық күйін тез реттей алсаңыз, онда АҚ электромагниттік моментін тікелей басқаруға болады. Бұл бекіту (4.3) және (4.4) негізінде алынған келесі өрнектен туындайды):

$$M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s \cdot L_r} \cdot |\bar{\psi}_r| \cdot |\bar{\psi}_s| \sin(\rho_s - \rho_r) \quad (4.8)$$

мұндағы ρ_r - бекітілген координаттар жүйесінің α түзу осіне қатысты ротордың шашырау ағымының векторының айналу бұрышы.

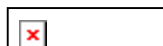
Ротордың уақыт тұрақтысы статордың тұрақты уақытынан едәуір үлкен болғандықтан, сәйкесінше ротордың ағымының өзгеруі статордың өтпелі кезеңдеріне қарағанда баяу жүреді және ротордың ағымының әр уақытта тұрақты мәнге жақын болады (бұл басқару сигналының жылдамдығы ротордың тұрақты уақытынан үлкен болған кезде маңызды).

Осылайша, статор шашырауының ағу Модулінің тұрақтылығын сақтаған жағдайда, АҚ электромагниттік моменті ротор мен статор шашырауының ағу векторлары арасындағы бұрыштың өзгеруімен ($\rho_s - \rho_r$) бақылануы мүмкін. Статордың қажетті ағынына қол жеткізу әдісі - кернеу инверторының тиісті кілттерін уақтылы қосу, яғни инвертордың тиісті күйін қалыптастыру. Егер сіз статордың белсенді кедергісіндегі кернеудің төмендеуін елемейтін болсаңыз, онда статор ағыны тікелей статор кернеуінің векторымен анықталады:

$$\frac{d \vec{\psi}_s}{d t} = \vec{u}_s$$

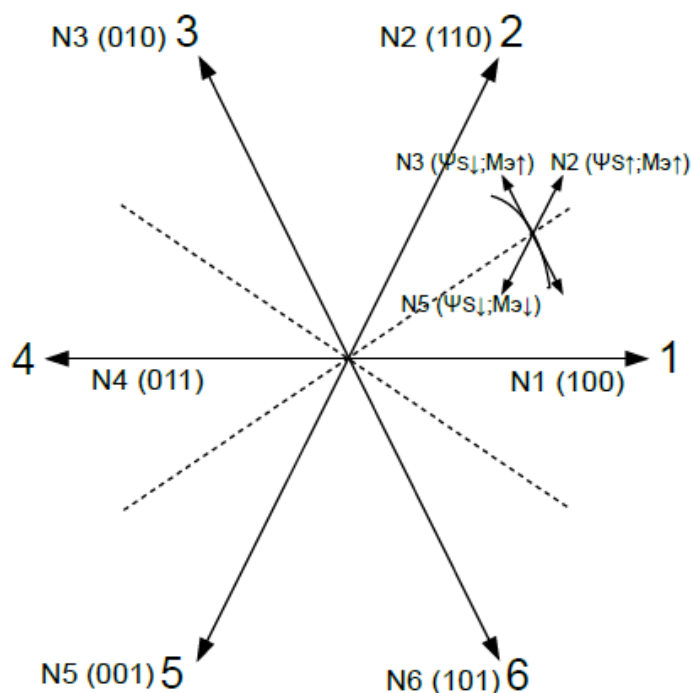
немесе шағын өсінділерде:

(4.9)



Статор ағынының векторының модулін (ағынның мәні) және электромагниттік моментті жеке басқаруға ағымдағы жағдайды ескере отырып, шашыраудың кеңістіктік векторының радиалды және тангенциалды компоненттеріне әсер ету арқылы қол жеткізіледі. Радиалды және тангенциалды компоненттер статордың белсенді кедергісі ($R_s = 0$) ескерілмеген жағдайда тиісті бағыттар бойынша статор кернеуінің кеңістіктік векторының тиісті компоненттеріне тура пропорционал.

4.2-суретте статордың ағындық векторының мүмкін болатын динамикалық позициясы және оның қуат инверторының күйіне байланысты ағындық және моментті өзгертудің әртүрлі нұсқалары көрсетілген.



Сурет 4.2 - Векторлардың орналасу секторлары

4.2-суреттегі Үлкен сандар статор ағынының векторын табуға болатын θ секторларын көрсетеді. $\Psi_{S\downarrow}$ және $\Psi_{S\uparrow}$ символдары, тиісінше, статор ағымының Модулінің ұлғаюы мен азаюын білдіреді, ал $M\downarrow$ және $M\uparrow$, сәйкесінше, АҚ электромагниттік моментінің ұлғаюы мен азаюын көрсетеді.

4.2-сурет пен өрнекке (4.7) сәйкес вектордың ағымдағы жағдайына, ағындық мәндерге және электромагниттік моментке сәйкестіктің 3-кестесі жасалды.

4.1-кестені есептеу ағындық вектордың мүмкін болатын ағымдағы жағдайының әр секторы үшін 4.2-кестені жазуға мүмкіндік береді.

Кесте 4.1 - векторлардың орналасуына байланысты жүйенің әсері

Жүйенің параметрге әсері	Ұлғайту	Азаюы
Статор ағыны	N_k, N_{k+1}, N_{k-1}	$N_{k+2}, N_{k-2}, N_{k+3}$
Электромагниттік момент	N_{k+1}, N_{k+2}	N_{k-1}, N_{k-2}

4.2 кесте - ағындық мақсат векторының ықтимал ағымдағы позицияларының секторлары

Ағындық вектордың секторы		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
Ағынның көбеюі	Моменттің ұлғаюы	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_1

	Моментті сақтау	N ₀	N ₇	N ₀	N ₇	N ₀	N ₇
	Моменттің азаюы	N ₆	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅
Ағындарды азайту	Моменттің ұлғаюы	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₁	N ₂
	Моментті сақтау	N ₇	N ₀	N ₇	N ₀	N ₇	N ₀
	Моменттің азаюы	N ₅	N ₆	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄

Жалпы жағдайда фазалық сектордың нөмірін есептеу келесі теңсіздіктерге сәйкес жүзеге асырылуы мүмкін, егер біз ағынның векторының өзгеруін ескеретін болсақ Ψ_S :

егер $0 \leq \psi_s \leq \frac{\pi}{6}$, онда Ψ_S N₁ секторына тиесілі

егер , онда Ψ_S N₂ секторына тиесілі

егер , онда Ψ_S N₃ секторына тиесілі

егер , онда Ψ_S N₄ секторына тиесілі

егер $\frac{7\pi}{6} \leq \psi_s \leq \frac{3\pi}{2}$, онда Ψ_S N₅ секторына тиесілі

егер , онда Ψ_S N₆ секторына тиесілі

егер , онда Ψ_S N₇ секторына тиесілі

Алайда, ψ_s бұрышымен есептеулер жүргізу өте қиын, өйткені иррационал сандармен кез-келген операция жинақталған қатенің пайда болуына әкеледі.

Сондықтан, іс жүзінде фазалық сектордың нөмірін анықтау үшін ψ_s бұрышы емес, оның тригонометриялық функциялары қолданылады. Әдетте, бұл $\sin\psi_s$ және $\cos\psi_s$.

Уақыттың әр сәтінде статордың ағындық векторы орналасқан фазалық сектордың нөмірі ауысу кестесінің бағандарын анықтайды. Осы кестенің жолдарын қалыптастыру үшін МТБ жүйесін реттегіштер блогы қолданылады. Реттегіштер блогы екіге бөлінеді - дискретті және үздіксіз. Дискретті бөлікке гистерезис түріндегі релелік реттегіштер кіреді. Шетелдік басылымдарда бұл реттегіштер "hysteresis flux comparator" және "hysteresis torque comparator" деп аталады. Айта кету керек, мұнда және одан әрі "гистерезис" термині сөздің жалпыланған мағынасында осы типтегі сызықты емес мағынаны білдіреді және гистерезистің физикалық құбылысына ешқандай қатысы жоқ. Статор ағынының реттегішінің кірісінде статор ағынының векторының амплитудасының номиналды мәніне пропорционал тұрақты сигнал және осы параметр бойынша кері байланыс сигналы ағын мен моментті есептеу блогынан

келеді. Бұл реттегіш көп жағдайда гистерезис ілмегі бар қос позициялы реле болып табылады, бірақ сезімталдық аймағы жоқ. Қозғалтқыштың электромагниттік момент реттегішінің кірісінде моменттің тапсырмасы болып табылатын сызықтық жылдамдық реттегішінің шығуынан сигнал және электромагниттік момент арқылы кері байланыс сигналы қосылады. Бұл реттегіш, әдетте, гистерезис ілмегі бар және сезімталдық аймағы бар үш позициялы реле болып табылады. Релелік реттегіштердің шығыс сигналдары бірлік амплитудасы бар сатылы функциялар болып табылады. Бұл сигналдар ауысу кестесінің жолдарын құрайтын дискретті сигналдарға айналады. Әдетте бұл түрлендіру тікелей ауысу кестесін құрайтын блокта жүреді. Алайда, МТБ жүйелерін математикалық модельдеу кезінде бұл түрлендіргішті релелік реттегіштердің Шығыс сипаттамаларының мүмкін комбинацияларымен өзгеруді жеңілдету үшін тәуелсіз функционалды блокқа бөлген жөн. Қарапайым жағдайда коммутация кестесіндегі жолдардың ең аз саны төрт екені анық. Бұл жағдайда релелік реттегіштердің екеуі де қос позициялы реле болып табылады. Ең жиі кездесетіні - алты жолдан тұратын коммутация кестесі. Бұл опция ағындық реттеуіштегі Қос позициялы релеге және момент реттеуішіндегі үш позициялы релеге сәйкес келеді. Неғұрлым күрделі алгоритмдер релелік реттегіштердің екеуі де үш позициялы болған кезде тоғыз жолдан тұратын коммутациялық кестелерді қолданады. Релелік реттегіштердің басқа конфигурациялары мүмкін, бірақ олар сирек қолданылады [21].

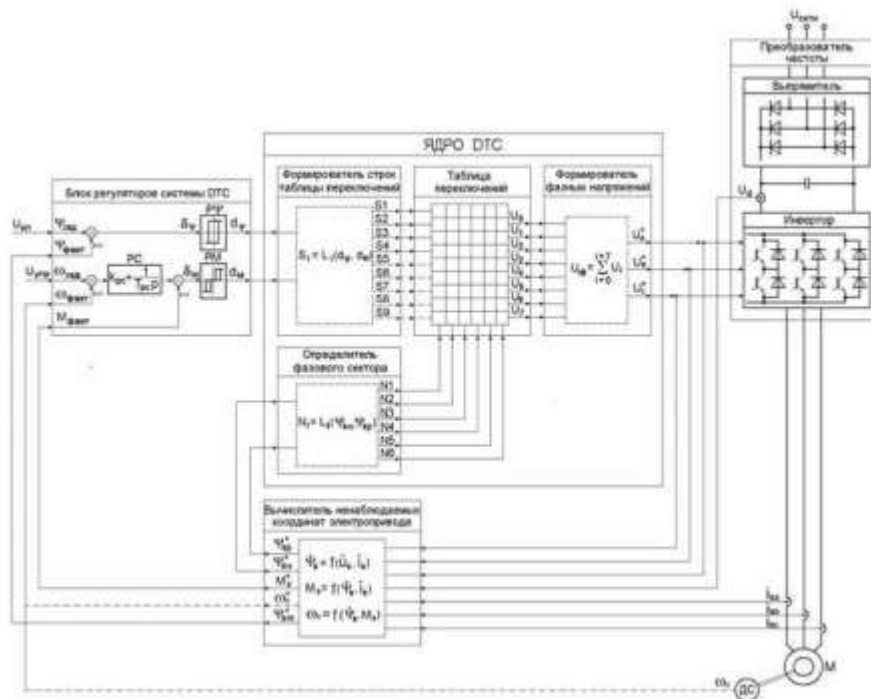
4.4 МТБ жүйесінің функционалды жұмысының сипаттамасы

Асинхронды электр жетегінің моментін тікелей басқару жүйесі бірнеше функционалды блоктарды қамтиды, олардың әрқайсысы әртүрлі тәсілдермен жүзеге асырылуы мүмкін. Осыған байланысты МТБ жүйелерінің математикалық модельдерін құрудың келесі тәсілі орынды болып көрінеді. Бұрын қарапайым динамикалық байланыстардың көмегімен жүзеге асырылатын құрылымдық схемалар түрінде жүйенің барлық функционалды блоктарының модельдері бөлек жасалады. Функционалды блоктардың алынған құрылымдық схемалары қосалқы жүйелер деп аталады. Термин (subsystem) MATLAB инженерлік және ғылыми есептеулер жүйесінде алынған [21]. Мұнда ішкі жүйе дегеніміз - жалпы модельге белгілі бір макро блок түрінде кіретін жеке функционалды блоктың математикалық моделі. Қосалқы жүйенің кірістері – бұл жалпы модельдің берілген элементі үшін басқару және бұзу әсерінің жиынтығы, ал шығулар-зерттеу нысаны болып табылатын өзгермелі күйлер, олар бір уақытта басқа қосалқы жүйелер үшін кіріс әсерлері ретінде қызмет етеді. Қарастырылып отырған функционалды блокта жүретін процестерге байланысты барлық есептеу операциялары ішкі жүйеде жүзеге асырылады. Осылайша, барлық қажетті ішкі жүйелерді дамыта отырып, МТБ жүйесінің жалпы моделін қарапайым динамикалық байланыстарды аз қолдана отырып немесе олардан бас тарта отырып, дайын ішкі жүйелерден құруға болады. Бұл көріністе rim жүйесінің моделін өзгерту бір немесе бірнеше ішкі жүйені басқаларымен ауыстыруға дейін азаяды. Математикалық модельдің жалпы құрылымы сақталады. Модельдеуді бастамас бұрын, ең алдымен, құрылымдық схемалары жасалуы керек функционалды блоктарды анықтау қажет. Модельдеу кезінде бастапқы нүкте МТБ жүйесінің функционалды схемасы болғандықтан, зерттеу объектісін жеке функционалды блоктарға бөлу осы схемаға сәйкес жүргізілуі керек. Бұл бөлімде МТБ DTC (direct torque control) деп белгіленген 4.3-суретте көрсетілген моментті тікелей басқару жүйесінің функционалды схемасы негіз ретінде қабылданған [21]. DTC жүйесі келесі функционалды блоктарды қамтиды:

- DTC жүйесін реттегіштер блогы;
- ауысу кестесінің жолдарын қалыптастыру блогы;
- фазалық секторды анықтау блогы;
- ауыстыру кестесін іске асыратын блок;
- фазалық кернеулерді қалыптастыру блогы;
- жетектің бақыланбайтын координаттарын есептеу блогы.

Бұл блоктарды тұтастай алғанда электр жетегінің математикалық моделін қалыптастыру кезінде ішкі жүйелер түрінде ұсынған жөн. МТБ жүйесін реттегіштер блогы үшін кіріс әсерлері-берілген айналу жиілігіне пропорционал u_{pr} басқару сигналы, $\psi_{\text{зад}}$ қозғалтқыш статорының ағындық Модулінің берілген мәніне пропорционал UOP анықтамалық сигналы, сондай-ақ бақыланатын айнымалылардың нақты мәндері бойынша кері байланыс

сигналдары, атап айтқанда статор ағынының модулі $\psi_{\text{факт}}$, $M_{\text{факт}}$ -тің электронды магниттік моменті және $\omega_{\text{факт}}$ қозғалтқышының айналу жиілігі.



4.3 сурет - Тікелей басқару жүйесінің функционалдық схемасы

Бұл қосалқы жүйенің шығыс сигналдары статор ағынының релелік реттегіштерінің және $d\psi$ және dM қозғалтқышының электромагниттік моментінің коммутациялық функциялары болып табылады. Бұл дискретті сигналдар. Олар (-1...0...1) диапазонында өзгереді және келесі қосалқы жүйе үшін кіріс әсерлері болып табылады - ауысу кестесінің жол түзілу блогы. Бұл қосалқы жүйенің шығыс сигналдары S1...S9 кестесінің жолдарының нөмірлері болып табылады, олардың саны $P\psi$ және PM релелік реттегіштерінің таңдалған конфигурациясымен және қабылданған ауыстырып-қосу кестесімен анықталады. Кесте жолдарының ең аз саны-4, максимум-9. Сондықтан 4.3-суретте S5...S9 байланысы нүктелі сызықпен көрсетілген [21].

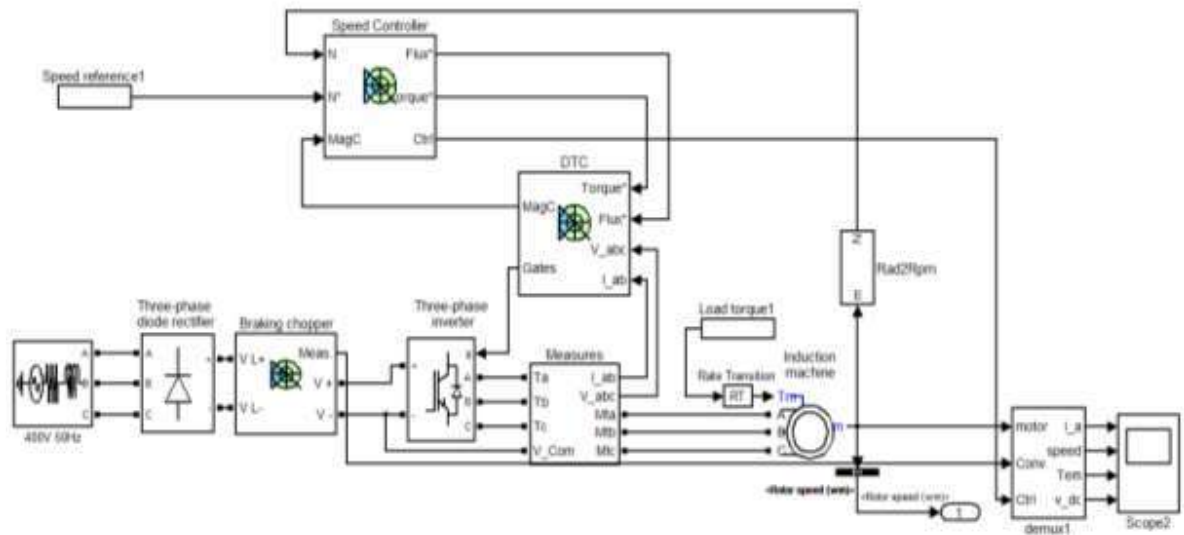
Келесі қосалқы жүйе фазалық секторды анықтау блогы болып табылады. Бұл ішкі жүйенің кіріс әсерлері-бұл бекітілген координаттар жүйесіндегі статор ағынының компоненттері $\Psi_{s\alpha}$ және $\Psi_{s\beta}$. Көп жағдайда статор ағынының векторының құрамдас бөліктерін емес, статор ағынының векторының лездік позициясы мен α координаталар жүйесінің бекітілген осі арасындағы ψ_s ($\sin\psi_s$ және $\cos\psi_s$) бұрышының тригонометриялық функцияларын осы ішкі жүйенің кіріс сигналдары ретінде пайдалану ыңғайлы. Бұл қосалқы жүйенің шығу сигналдары- $N1...N6$ ауыстыру кестесінің баған нөмірлері. Фазалық секторлардың саны, демек, ауысу кестесінің бағандарының саны асинхронды қозғалтқыш фазаларының санымен анықталады. Үш фазалы жүйелер үшін бағандар саны әрқашан алтыға тең болады. Коммутация кестесінің жол түзеткіші мен фазалық сектордың детерминантының шығыс сигналдары коммутация кестесін жүзеге асыратын

келесі Ішкі жүйе үшін кіріс басқару әсерін білдіреді. Кестенің шығыс сигналдары- $U_0 \dots U_7$ жиілік түрлендіргішінің Шығыс кернеуінің векторының сегіз мүмкін кеңістіктік күйі. Бұл сигналдар фазалық кернеулердің пайда болу блогы пайда болатын Ішкі жүйе үшін кіріс әсерлері болып табылады. U_A^* , U_B^* және U_C^* фазалық кернеулердің шығыс сигналдары жиілік түрлендіргішінің қуат инверторының электрондық кілттерін ауыстыру алгоритмі болып табылады. Олар сонымен қатар соңғы ішкі жүйеге - электр жетегінің бақыланбайтын координаттарын есептеу блогына әсер етеді. Коммутация кестесінің жолдарын түзгіште, фазалық сектордың детерминантында, коммутация кестесінде және фазалық кернеу түзеткішінде барлық операциялар электр желісінің параметрлеріне және қозғалтқыштың асинхронды параметрлеріне қарамастан жалғыз функциялармен жасалады. Бұл блоктар ДТС ядросы деп аталады. U_A^* , U_B^* және U_C^* сигналдарынан басқа, бақыланбайтын координаталық есептеуіш үшін кіріс әсерлері U_d жиілік түрлендіргішінің тұрақты ток тізбегіндегі кернеу сенсорының шығуынан және i_{SA} , i_{SB} және i_{SC} электр қозғалтқышының статор тізбегіндегі фазалық ток датчиктерінен сигнал болып табылады. Бұл қосалқы жүйенің шығуы координаталар жүйесіндегі $(\alpha - \beta) - \Psi^*s\alpha$ және $\Psi^*s\beta$, статор ағынының модулі Ψ^*s_m , m^*e электромагниттік моменті және ω^*r қозғалтқыш роторының айналу жиілігіне пропорционал сигналдарды алады. Статор ағынының векторының компоненттері $\Psi^*s\alpha$ және $\Psi^*s\beta$ фазалық сектордың детерминанты үшін кіріс әрекеті ретінде қызмет етеді. Қалған сигналдар (Ψ^*_{sm} , M^*_E және ω^*_r) МТБ жүйесінің реттегіштер блогы үшін кері байланыс сигналдары ретінде қолданылады. Егер статор ағымының векторының модулі бойынша және қозғалтқыштың электромагниттік моменті бойынша кері байланыс сигналдары әрдайым есептелген болса, онда қозғалтқыштың айналу жиілігі бойынша кері байланыс сигналы есептелген (ω^*r) немесе айналмалы жылдамдық сенсорының (ω_r) көмегімен тікелей индикация арқылы алынуы мүмкін. Сондықтан суретте. 4.3 бір-бірін жоққа шығаратын осы екі байланыс нүктелі сызықпен көрсетілген [21].

4.5 МТБ жүйесіндегі өтпелі үдерістерді есептеу

МТБ жүйесінің өтпелі процестерін зерттеу MATLAB бағдарламасында жүзеге асырылады. Ол үшін 3.19-в суретте жоғарыда келтірілген бірдей модель қарастырылады.

Бұл модель MathWorks электр жетегі саласындағы мамандар үшін арнайы жасалған дайын блок болып табылады. Егер сіз блокты кеңейтсеңіз, 4.4-суретте көрсетілген жылдамдықтың кері байланысы бар бір қозғалтқышты МТБ жүйесін көре аласыз.

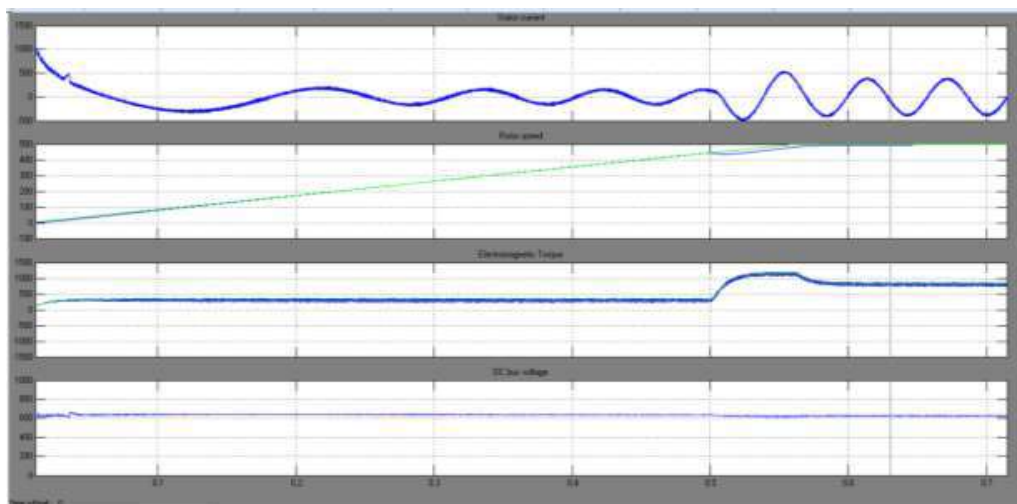


Сурет 4.4 - MATLAB бағдарламасында МТБ бар бір қозғалтқыш жүйесінің моделі

МТБ жүйесінде сыртқы реттегіш рөлін атқаратын ПИ реттегіші реттеуші ретінде қолданылады. Осциллограммаларда ω^* қозғалтқыш роторының айналу жиілігінің өзгеру қисықтары, M_s^* қозғалтқышының электромагниттік моменті, i_s^* қозғалтқыш статор тогының амплитудалық мәні, U_d^* тұрақты ток буынының амплитудалық мәні көрсетілген. Pim жүйесінің оңтайлылығын анықтау үшін жиілікті реттейтін электр жетегінің келесі жұмыс режимдері қарастырылады:

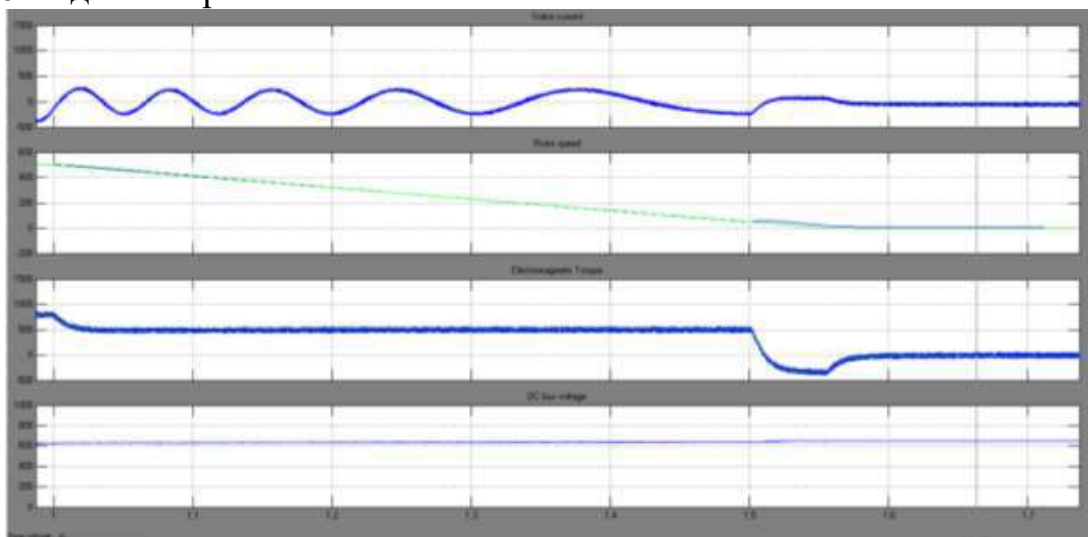
- қозғалтқышты қозғалмайтын күйден ω_r номиналды айналу жиілігіне дейін іске қосу*;
- қозғалтқышты номиналды ω_r * айналу жиілігінен толық тоқтауға дейін тежеу;
- қозғалтқыштың номиналды жылдамдығынан "Алға" ω_r * бағытында номиналды айналу жиілігіне "артқа" ω_r бағытында бұрылуы*;
- жүктемеден асатын эскиз;
- жүктемені M_c^* - дан 10% - ға дейін түсіру.

4.5-суретте нөлден номиналды айналу жиілігіне дейін іске қосу кезіндегі электр жетегінің іске қосу сипаттамалары көрсетілген. Қозғалтқыштың электромагниттік моментінің максималды мәнін шектеу релелік момент реттегішінің параметрлерімен анықталады. Бұл мысалда электромагниттік моментті шектеу 1,5 МэН деңгейінде орнатылды. Жиілікті реттейтін электр жетегіндегі тежеу, қабылданған басқару жүйесіне қарамастан, электродинамикалық әдіспен жүзеге асырылады - тұрақты ток тізбегінде бақыланбайтын түзеткіш болған кезде немесе рекуперативті әдіспен – тізбекте басқарылатын, Белсенді деп аталатын түзеткіш болған кезде.



4.5 сурет - Асинхронды қозғалтқышты нөлден бастап МТБ жүйесіндегі асинхронды қозғалтқыштың номиналды айналу жиілігіне дейін іске қосу

4.6-суретте МТБ жүйесімен жиілікті басқару кезінде асинхронды қозғалтқыштың тежеу режимі белгіленген жылдамдықтан $\omega_{\text{НОМ}}^* = 500$ -ден $\omega_{\text{НОМ}}^* = 0$ -ге дейін көрсетілген.

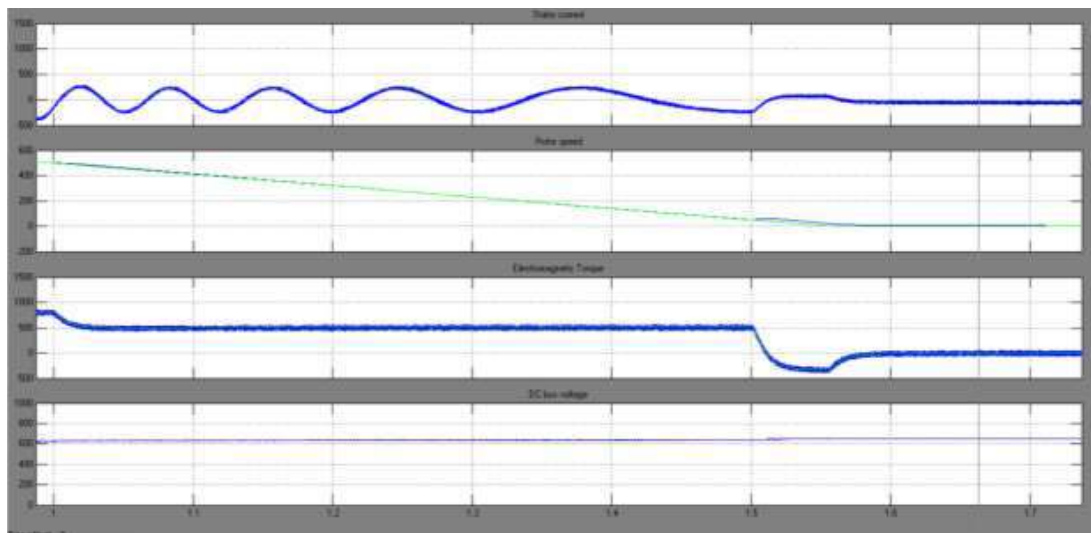


4.6 сурет - номиналды жиіліктен МТБ жүйесінде толық тоқтағанға дейін асинхронды қозғалтқыштың тежелуі

Тежеу кезіндегі өтпелі процестердің сипаты таңдалған жылдамдық реттегішінің түріне байланысты емес. Бастапқы сигнал нөлге ұмтылған кезде, барлық негізгі айнымалылар өтпелі процесс аяқталғаннан кейін нөлге айналады.

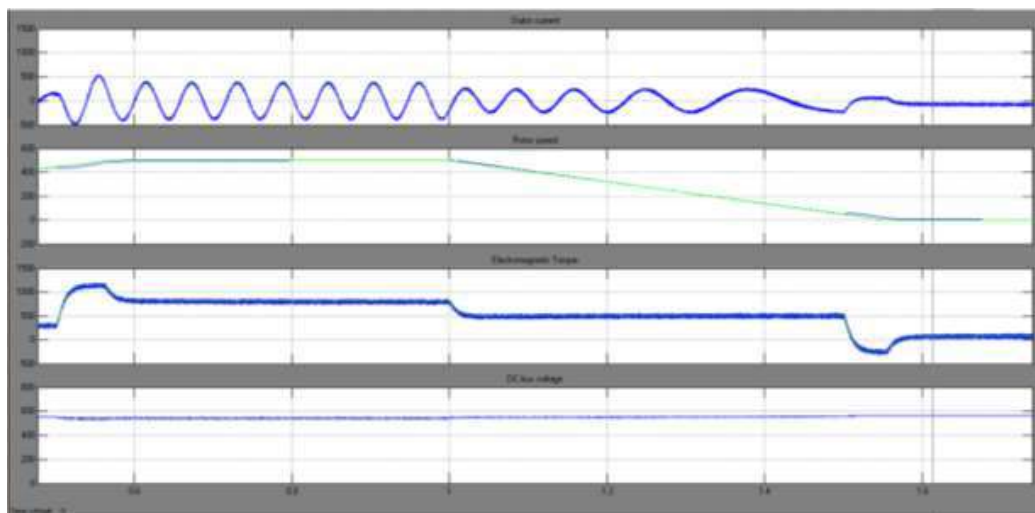
МТБ жүйесінде электр жетегін реверсиялау үшін қосымша қаражат қажет емес. Кері жылдамдық реттегіш кірісіндегі сигналдың белгісін өзгерту арқылы жүзеге асырылады. Кері сигнал берілген кезде жүйе алдымен тежегіш режиміне, ал айналу жиілігінің нөлдік мәніне жеткенде қозғалтқыш режиміне өтеді. Бұл жағдайда жиілік түрлендіргішінің Шығыс кернеуінің фазалық

реттілігінің өзгеруі фазалық сектордың детерминантынан шыққан импульстардың реттілігін өзгерту арқылы қамтамасыз етіледі. - Суретте көрсетілген. 4.7 электр жетегінің "Алға" бағыттағы толық айналу жиілігінен "артқа" бағыттағы толық айналу жиілігіне дейінгі реверсивті сипаттамасы келтірілген.



Сурет 4.7 - МТБ жүйесіндегі асинхронды қозғалтқыштың реверсі

Қозғалтқыштың айналу жиілігінің бағыты өзгерген кезде статор ағынының амплитудасының өзгеру қисығында қысқа мерзімді сәтсіздік пайда болады, ол тез жойылады. МТБ жүйесіндегі қарастырылған өтпелі процестер- бұл басқару әсерінің өзгеруіне жүйенің реакциясы. Сондай-ақ, жүйенің бұзылу әсерінің өзгеруіне реакциясы қызығушылық тудырады. Жүйенің реакциясын 100% - ға бағалау, 4.8-суретте көрсетілген номиналды жүктеменің 10% - на дейін және жүктеменің қалпына келтірілуіне әсер ету әсерінің дамуы өте қарқынды екенін көрсетті. Белгіленген мәндерден жылдамдықтың ауытқуы үлкен.



4.8 сурет - МТБ жүйесіндегі номиналды айналу жиілігі кезінде асинхронды электр жетегіндегі жүктемені салу және түсіру

Осылайша, МТБ жүйесіндегі өтпелі процестерді талдау нәтижелері жүйенің ешкі крандарының қозғалыс механизмдерінің электр жетегінің әртүрлі режимдерінде жұмыс істейтінін және жылдамдық тұрғысынан да, тегіс реттеу тұрғысынан да өтпелі процестердің жоғары сапа көрсеткіштеріне ие екенін көрсетті [21].

4.6 Моментті шектеу функциясымен тікелей моментті басқаруды іске асырудың эксперименттік бөлігі

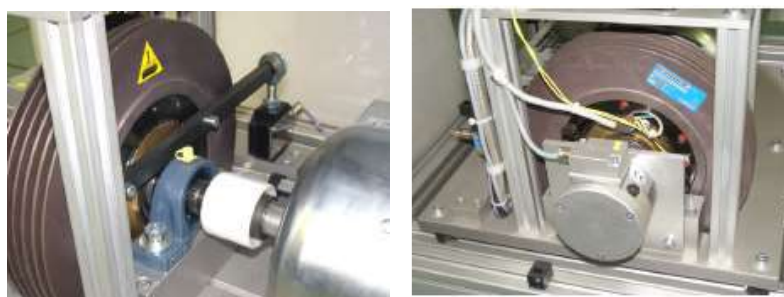
Реттегіштерде моментті шектеу арқылы білікке моментті шектеу мүмкіндігі.

Ең алдымен, электр жетегі жасаған сәтті шектеу кран механизмін қолайсыз жүктемелерден қорғауға, оның сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұл шектеу электр жетегінің өзін қажетсіз жүктемелерден қорғаудың қосымша құралы болып табылады. Бұл функция altivar 71 жиілік түрлендіргіші және қуаты бірдей және 1,5 кВт болатын асинхронды торлы қозғалтқышы бар зертханалық стенд көмегімен жүзеге асырылады. Бұл стенд 4.9 суретте көрсетілген.



Сурет 4.9 - Altivar 71 жиілік түрлендіргішінің стенді

Жүктеме ретінде 4.10-суретте көрсетілген арнайы ұнтақ тежегіші қолданылады, оның функциясы әр түрлі жүктемелердің қалыптасуы болып табылады, бұл жағдайда тұрақты момент ($M=\text{const}$). Тежегішпен жүктемені жасау автоматты және қол режимінде жүзеге асырылуы мүмкін.

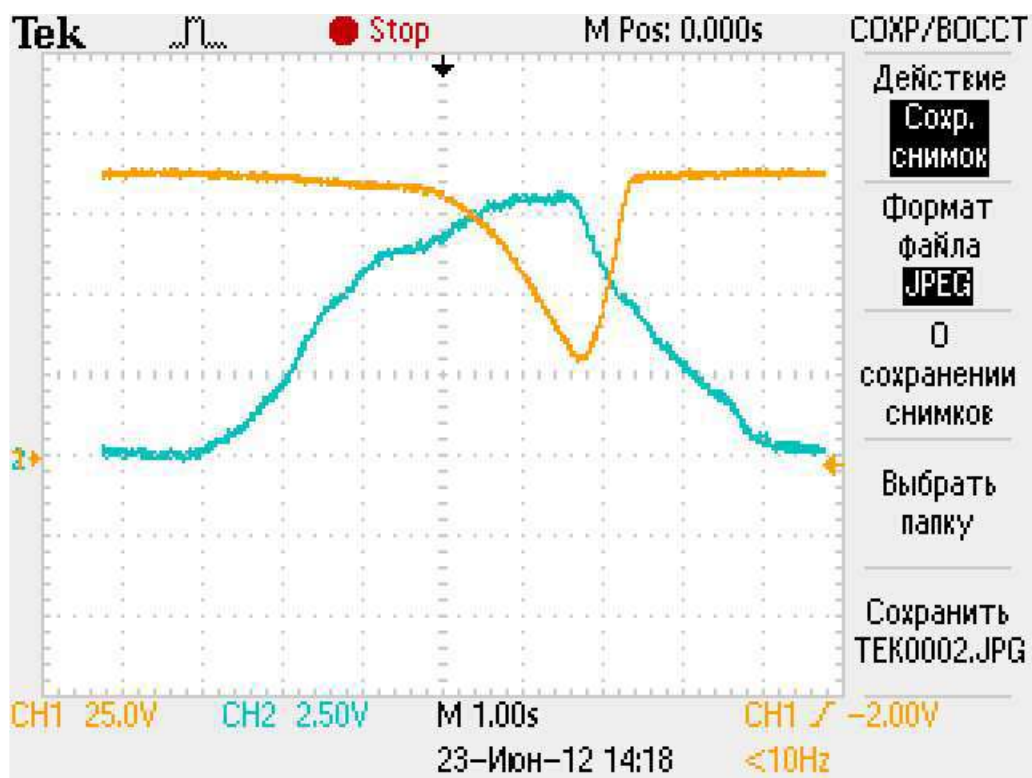


Сурет 4.10-жүктемені имитациялауға арналған ұнтақты тежегіш

Тәжірибені жүзеге асыру үшін Altivar-71 қуаты қосылды және конфигурацияға $\text{MOGR} = 80\%$ орнатып, L11 қосқышына функцияны белсендіруді тағайындау арқылы "момент шегі" функциясы қосылды. Біз ұнтақты тежегішті басқару жүйесін дайындадық:

- басқару режимін "Қолмен" баптау»;
- потенциометрдің сол жақ (min) жағдайында "тежегішті белсендіру" кілтін бұру арқылы жүктемені қосуды реттеу "қол режиміндегі жүктеме деңгейі»;
- "қол режиміндегі жүктеме деңгейі"потенциометрі арқылы жүктеме моментінің мөлшерін басқаруды орнату. Содан кейін біз дискіні номиналды жылдамдыққа қостық және жүктеме моментін 0-ден 100% - ға дейін арттырдық (потенциометрдің айналуы), біз функцияның жұмыс істейтініне көз жеткіздік,

бұл жетектің толық тоқтауына дейін шекті қамтамасыз етеді. 4.11-суретте көрсетілген электр жетегінің номиналды механикалық сипаттамасында жүктемені арттыру және азайту процесін осциллографиялау жүргізілді.



4.11 сурет - МТБ жүйесіндегі моментті шектейтін осциллограммалар

Алынған осциллограммаларға сәйкес сіз осы функцияны қолданудың практикалық маңыздылығын анықтай аласыз. Бұл шамадан тыс жүктеме режимдерінде белгіленген сәттен жоғары, айналу жылдамдығы мен электромагниттік момент азаяды, бұл кезде кран механизмінің беріктігі сақталады.

Қорытынды

Айналмалы координаттар жүйесіндегі құрылымдық модельге сәйкес MATLAB бағдарламасында алынған қуаты 7,5 кВт асинхронды қозғалтқыштың моменті мен жылдамдығының өтпелі процестері зерттелді. Нәтижесінде номиналды жылдамдыққа дейін 0,5 секундтан кейін жүктемені іске қосу және түсіру режимінде тұрақтылық байқалады;

Екі координат жүйесіндегі асинхронды қозғалтқыш құрылымдарының математикалық сипаттамасына талдау жасалды. Нәтиже олардың арасында айтарлықтай айырмашылық жоқ екенін көрсетті, бұл олардың динамикалық режимдерге бірдей қарсылығына байланысты. Индукциялық қозғалтқыштың математикалық сипаттамалары қозғалтқыштың кернеу көзінен қуат алу жағдайында қолайлы. Мұндай көз желі немесе дербес кернеу инверторы болуы мүмкін.

Сәйкес келмеу үшін жалпы кері байланыс коэффициенті бар арнайы жасалған құрылымдық схемаға сәйкес екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің динамикасының математикалық сипаттамасы жасалды. MATLAB бағдарламасындағы сәйкессіздік бойынша кері байланыстың жалпы коэффициенті есептелді. MATLAB бағдарламасының көмегімен жүктеме моменті бойынша әртүрлі динамикалық бұзылулары бар өтпелі процестер зерттелген, Simulink арнайы құралында әртүрлі динамикалық жүктемелері бар екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегін компьютерлік модельдеу жүргізілген. Алынған өтпелі процестерге сәйкес, жүйе роторлардың айналу жылдамдығын 0,2 статикалық қатемен теңестіреді. Жиілікті реттейтін электр жетегін басқарудың оңтайлы әдісі қажет болғандықтан, басқарудың үш әдісі зерттелді. Нәтижесінде моментті тікелей басқару қабылданды, оның көмегімен жүйенің моменттің күрт өзгеруіне тез реакциясы болады.

МТБ жүйесіндегі өтпелі процестерді талдау нәтижесінде жүйенің тіректі крандарының қозғалыс механизмдерінің электр жетегінің әртүрлі режимдерінде жұмыс істейтіндігі және жылдамдық тұрғысынан да, тегіс реттеу тұрғысынан да өтпелі процестердің жоғары сапа көрсеткіштеріне ие екендігі көрсетілген.

МТБ жүйесіндегі с моментін шектей отырып, эксперименттік бөлік жасалды, оны қолдану тіректі кранның қозғалу механизмінің тозуын азайтуға көмектеседі.

Қысқартылған сөздер тізімі

ТК - тіректі кран

ЭЖБ - электр жұмыс білігі

ЭМЖ - электромеханикалық жүйесі

ЭҚК - электр қозғаушы күші

АКЗ - қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды электр қозғалтқышы

ЖТ - жиілік түрлендіргіші

МҚК - магнит қозғаушы күші

ЕИМ - ендік импульсті модуляциясы

МТБ - моментті тікелей басқару

Пайдаланылган әдебиеттер тізімі

1. Теличко Л. Я. Ограничение динамических нагрузок электромеханических систем группы общепромышленных механизмов на металлургических предприятиях: Дисс.докт.техн.наук. – Москва, 2006.
2. Абрамович И.И., Г.А. Котельников. Козловые краны общего назначения - М: Машиностроение, 1983 г.
3. Акпанбетов Д.Б. Энергосберегающий многодвигательный асинхронный электропривод ленточного конвейера: Дисс. канд. техн. наук: 05.09.03. – Алматы, 2009.
4. Дорофеев А.А. Разработка и исследование систем электроприводов, обеспечивающих бесперекусное движение мостовых кранов: Дисс. канд. техн. наук: 05.09.03. – Липецк, 2010.
5. Герман – Галкин С.Г. Matlab&Simulink: Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: «Корона Век», 2011.
6. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие.- СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
7. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: МЭИ, 2003.
8. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/А90.-М.: Энергоиздат, 1982.
9. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений.- М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.-496 с.
10. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов – М:Академия, 2006.
11. Лой В.Н., Протас П.А., Завойских Г.И. Лесоскладское грузоподъемное оборудование: учеб.метод. пособие для студентов. – Мн.: БГТУ, 2005. – 102 с.
12. Коломинова М. В. Грузоподъемное оборудование для нижнескладских работ: МУ к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Технологические процессы и оборудование лесозаготовительного производства» /М. В. Коломинова. – У.: УГТУ, 2013. – 54 с.
13. Проектирование электроприводов крановых механизмов. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 12, февраль 2009.
14. Расчет механизма передвижения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mylektsii.ru/1-62879.html>. – Загл. с экрана.
15. Электропривод передвижения тележки крана по системе ПЧ-АД [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vunivere.ru/work47817> – Загл. с экрана.
16. Кояин Н.В.. Электропривод общепромышленных механизмов. Лекции – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
17. Дроссели пусковые крановые [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://dimalmag.ru/production/reactor-electricdrive/rane-current-limiting-reactors.html>– Загл. с экрана.

18. Системы кранового электропривода [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.momentum.ru/ru/products-pt/skep/> – Загл. с экрана.
19. Иванченко Ф. К., Красношапка В. А. Динамика металлургических машин. – М.: Металлургия, 1983. – 295 с.
20. Крановые электродвигатели серии ДМТ и АМТ [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.esco-motors.ru/sites/default/files/kr_eldv.pdf. – Загл. с экрана.
21. Электрический привод: учебно-методическое пособие / Качин С.И., Чернышев А.Ю., Качин О.С.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 157 с.
22. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.kadrovik.ru/docs/pgosgortehnadSORA31.12.99n98.htm>. – Загл. с экрана.
23. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 164 с.
24. Преобразователи частоты Altivar 71. Каталог 09 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tesli.com/file/catalogue/schneider-electric/schneider-electric-altivar-71.pdf> – Загл. с экрана.
25. Системы управления электроприводов.: учебное пособие / Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В.. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.
26. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.