გელაშვილი გენადი

ღრმა ბურღვის საბურღი დანადგარების როტორული მაგიდის ელექტროამბრავის სისტემების კვლევა

> წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი, 0175, საქართველო სექტემბერი, 2008

საავტორო უფლება © 2008 გელაშვილი გენადი

### საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემორე ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გელაშვილი გენადის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: "**ღრმა** ბურღვის საბურღი დანადგარების როტორული მაგიდის ელექტროამძრავის სისტემების კვლევა" და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქარველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი:	სრ.პროფ.გივი მაჩაბელი
რეცენზენტი:	
რეცენზენტი:	
რეცენზენტი:	

### საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### წელი

ავტორი: გელაშვილი გენადი

დასახელება: "ღრმა ბურღვის საბურღი დანადგარების როტორული მაგიდის ელექტროამძრავის სისტემების კვლევა"

ფაკულტეტი : ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

სადისერტაციო ნაშრომს ვუძღვნი

ჩემ მშობლებს და დას.

### РЕЗЮМЕ

В мировой практике бурения нефтяных скважин в последнее время все большее распрстранение по сравнению с турбо- и электробурением получает роторное бурение. При бурении скважин на малые глубины гораздо эффективнее оказывается бурение с помощью погруженных двигателей, так как проходка верхних интервалов происходит на больших скоростях, при малом моменте сопротивления на долоте. При больших же глубинах, когда требуется большой момент на валу двигателя при малой скорости, применение погруженных двигателей нецелесообразно В СВЯЗИ со значительным увеличением их габаритов при ограниченном диаметре скважины. Поэтому, несмотря на большие потери на вязкое трение первого рода колонны бурильных труб о стенки скважины, способ роторного бурения при глубоких и сверхглубоких скважинах оказывается гораздо надежнее и эффективнее.

Изучение условий работы электродвигателей, применяемых в качестве приводных для роторного стола буровых установок, позволит качественно оценить достоинства и недостатки как самого электродвигатетеля, так и схемы управления им.

Основной целью данной работы является оценка динамических поазателей существующих и вновь разрабатываемых систем электропривода роторного стола буровых установок, предназначенных для бурения глубоких и сверхглубоких скважин в различных режимах работы бурового инструмента и КБТ.

Надежность работы бурильных труб в немалой степени определяется динамическими нагрузками, возникающими в них в процессе стационарного бурения и в переходных процессах. Механические напряжения, возникающие в КБТ, определяются большим числом весьма разнообразных факторов, среди которых не в последнюю очередь указать на скручивающие моменты. Также выявилась необходимость комплексного решения проблемы, так как, с одной

v

стороны, процесс бурения определяется не только давлением долота на забой, но и скоростью вращения и, с другой стороны, напряжения в бурильных трубах определяются как усилиями растяжения и сжатия, так и скручивающими моментами, т.е. нормальными и тангенциальными напряжениями.

Основной трудностью исследования переходных режимов работы электроприводов роторных столов буровых установок при большой глубине бурения является специфика механической части системы. В связи с этим в настоящей работе значительное внимание уделено вопросам математического описания динамики КБТ.

Были проведены эксперименты разных математических меотодов, показывающие поведение КБТ при разбуривании породы. В первом методе был рассмотрен и проведен «Анализ крутильных автоколебаний колонны бурильных труб», где показан режим место режим автоколебаний, когда в системе возникают незатухающие периодические колебания, вызванные не внешними периодическими воздействиями, а параметрами самой системы. Такой режим не возможен в линейных системах и поэтому и в линеаризованных системах этот режим исключается. Однако практически все системы являются нелинейными: одни допускают линеаризацию, а другие, называемые существенно нелинейными, не допускают. При изучении последних является необходимым рассмотрение вопроса возможности возникновения автоколебаний. Второй метод - «Режимы работы колонны бурильных труб в процессе бурения шарошечными долотами», где показано, что в процессе разбуривания породы частота колебаний центра долота настолько высока, что после нескольких оборотов долота влияние начальных условий практически будет незаметным, поэтому будем исследовать колебания колонны бурильных труб без начальных условий. В третьем методе – были проведены «Исследования крутильных колебаний КБТ методом конечных разностей и методом аналогий». Одним из наиболее распространенных приближенных методов решения дифференциальных уравнений с частными производными является метод конечных

vi

разностей. Основная идея метода заключается в том, что сплошное тело или среда рассматривается как совокупность большого числа элементарных объемов. Таким образом, конечно-разностное приближение представляет собой замену системы с распределенными параметрами набором дискретных элементов так, что характеристика исходной системы приближенно остается неизменной. Четвертый метод – «Метод аналогий». Пятый метод – «Исследования крутильных колебаний КБТ при скачкообразном возрастании момента сопротивления на долоте». Шестой метод – «Определение напряжений при крутильных колебаниях колонны бурильных труб». В заключительной главе был выбран и расчитан электропривод роторного стола буровой установки, а также проанализированы несколько режимов работы электропривода.

### რეზიუმე

ჭაბურღილის სანგრევზე ქანების დამანაწილებელი ინსტრუმენტის ეფექტური მუშაობისა და ბურღვის ოპტიმალური რეჟიმების შერჩევის პროგნოზირების მეთოდების დამუშავებისას, როგორც წესი, გამოიყენება ემპირიული დამოკიდებულების ფაქტორი, რომელიც აკავშირებს სატეხის რეჟიმულ მუშაობის მაჩვენებლებს პარამეტრებთან, მაგრამ არ ითვალისწინებს საბურღი სვეტის მექანიკურ თავისებურებებს. ამდაგვარი მიდგომის შედეგად სახეზე გვაქვს მითითებული დამოკიდებულების დიდი მოცულობა, რომლებიც, საკმაოდ ხშირ შემთხვევებში, არ მოდიან - შესაბამისობაში. სხვა თანაბარ პირობებში აღნიშნულ ერთმანეთთან ფაქტებს ხშირად აქვთ ადგილი, ვინაიდან არ არის გათვალისწინებული ურთიერთგავლენა სვეტის სამტვრევზე სამტვრევისა ქანის და დროს. ქანების სამტვრევი ინსტრუმენტის მუშაობის დამტვრევის პროცესის განხილვას საბურღი სვეტისაგან დამოუკიდებლად, ანუ მისგან ხშირად ნავთოპისა გაზის განცალკევებით, და ჭაბურღილების გაბურღვის კანონზიმიერებათა პროცესის კვლევის მცდარ შედეგამდე მივყავართ – მთელი თავისი შედეგებით ტექნიკის ამ სფეროს თეორიული და პრაქტიკული მიზნებისათვის.

წინამდებარე მონოგრაფიაში მოცემული მასალები უკავშირდება საბურღი სვეტის მექანიკური თავისებურებებისა და ბურღვის რეჟიმის პარამეტრების ზეგავლენას სამტვრევისა და ჭაბურღილის სანგრევის ურთიერთქმედების ხასიათზე. ამასთან, ძირითადი აქცენტი კეთდება მომენტზე, რომ ენერგიის მიწოდებას ქვის სამტვრევი ინსტრუმენტისადმი ისეთი დანადგარის მეშვეობით, როგორსაც საბურღი სვეტი წარმოადგენს (ელასტიური დრეკადი სხეული ძალზე მაღალი დაჭიმულობითა და მცირე მკვეთი ზომებით), შეუძლია არსებითად დაამახინჯოს ქანების მტვრევის სურათი, რომელზე დაკვირვებაც ლაბორატორიულ პირობებში ხდება, ხოლო ამის მიზეზი ტალღური პროცესები იქნება, რომელიც, თავის მხრივ, გაედინება საბურღ სვეტში ქვის ქანების ბურღვისას. მადალი განფენილობის/დაჭიმვის სვეტის ტანის, ანუ სამუშაო ღერძის მექანიკის საფუძვლები, ისევე, როგორც სხვა გარკვეული მონაცემები, აუცილებელი ხდება ტალღური პროცესების მიერ ქვის ქანების მტვრევის ეფექტურობაზე ზეგავლენის საკითხების გაანალიზებისათვის; ეს საკითხები სწორედ მოცემულ დისერტაციაშია განხილული.

ჩატარებულ იქნა რიგი მათემატიკური მეთოდების ექსპერიმენტები, თ-ს ქცევას ქანების გაბურღვის დროს. პირველი რომლებიც უჩვენებენ მეთოდის მეშვეობით განხილულ და ჩატარებულ იქნა "საბურღი მილების სვეტების მგრეხი სახის ავტორყევების ანალიზი"; აღნიშნული ანალიზის საფუძველზე ნაჩვენები იქნა რეჟიმი ავტორყევების რეჟიმის ნაცვლად, როდესაც სისტემაში ადგილი აქვს უქრობი პერიოდული რყევების წარმოშობას, რაც, თავის მხრივ, გამოწვეულია არა გარეშე პერიოდული ზემოქმედებით, არამედ თავად სისტემის პარამეტრების მიზეზით. ასეთი რეჟიმი არ დაიშვება სიგრძივ-ხაზოვანი სისტემებისათვის, ამიტომაც ეს რეჟიმი გამოირიცხება ეგ.წ. ლინეარიზებულ სისტემებშიც. თუმცა, არა სისტემა გვევლინება არასიგრძულ-ხაზოვანი სახით: ერთნი ყველა ლინეარიზაციას, ხოლო დანარჩენი – უწოდებენ რა მათ უშვებენ არსებით არასიგრძულს – არ უშვებენ. ამ უკანასკნელთა შესწავლისას აუცილებელია ავტორყევების წარმოშობის შესაძლებლობის საკითხის მეორე განხილვა. - მეთოდი გახლავთ " საბურღი მილების სვეტის სფერული სატეხით პურღვის პროცესში"; მუშაობის რეჟიმი 81 მითითებულია, რომ ქანების ბურღვის პროცესში სატეხის ცენტრის რყევის სიხშირე იმდენად მაღალია, რომ სატეხის რამდენიმე პრუნის პირველადი პირობების გავლენა პრაქტიკულად შეუმჩნეველი შემდეგ ხდება, ამიტომაც გამოვიკვლევთ საბურღი მილის სვეტის რყევას საწყისი პირობების გარეშე. მესამე მეთოდი გახლავთ " თ-ს მგრეხის სახის რყევების გამოკვლევა ანალოგიის მეთოდისა და საბოლოო სხვაობათა მეშვეობით". ნაწილოპრივი დანაყოფების/წილადის მეთოდის დონეების ყველაზე დიფერენცირებული გადაჭრის ერთერთი გავრცელებული და მიახლოვებული მეთოდი გახლავთ საბოლოო სხვაობათა მეთოდი. ამ მეთოდის ძირითადი იდეა იმაში მდგომარეობს, რომ მთლიანი სხეული ან გარემო განიხილება, როგორც ელემენტარული მოცულობების დიდი ოდენობის ერთობლიობა. ამ გზით, საბოლოოსხვაობრივი მიახლოვება წარმოადგენს სისტემის ერთგვარ შენაცვლებას დისკრეტული ელემენტების ნაკრების გადანაწილებული პარამეტრებით იმგვარად, რომ მიახლოებული ამოსავალი სისტემის მახასიათებლები

უცვლელი რჩება. მეოთხე მეთოდი გახლავთ "ანალოგიის მეთოდი". მეხუთე მეთოდი – " თ-ს მგრეხი სახის რყევების გამოკვლევა სამტვრევზე წინააღმდეგობის მომენტის ნახტომისებურად გაზრდისას". მეექვსე მეთოდს ეწოდება "საბურდი მილის სვეტების მგრეხის სახის რყევისას მაბვის განსაზღვრა". ბოლოს, მეშვიდე მეთოდია " თ-ს მოდელის აშენების პრინციპი და დამუშავება". აღნიშნული მეთოდებიდან გამომდინარე, შერჩეულ და გათვალისწინებულ იქნა "УБШ 501 " საბურდი ჩარხის ელექტრომრავით მართვის სისტემა".

#### ABSTRACT

For elaboration of methods of forecasting of operating efficiency of rockdrawing instrument on the chink face and for selection of drilling optimum regime, empirical dependence are applied as a rule; these empirical dependence connect the indicators and indexes of waste courses of chisels with operating condition, but do not consider mechanical properties of drill column. Such approach generated great amount of the mentioned dependences, which quite frequently do not comply with each other. The mentioned facts, considering the other equal conditions, often have place as the issue of interference of chisel and column is not taken into account during demolition of species on the face. Discussion of working process of rock-destroying in separation from drill column frequently may result in incorrect and false interpretation of observation results for gassers' and oil wells' drilling process regularity and principles, considering any other subsequent consequences for the purposes of theory and practice of this sphere of technique. Materials included in the present monograph concern the issues of influence of drilling column's mechanical properties and drilling operating conditions on chisel interaction with well bottom. At the same time main accent is focused on the fact that energy supply to the rock cutting tool/rock destruction tool by means of such drive, as drilling column (elastic body with high extension and small lateral dimension) is may actually distort the image of rock cutting, being evaluated in laboratory conditions; reason for this are considered namely wave processes, proceeding within the drilling column during development and drilling-out of rock. Fundamental and essential principles of shanks mechanics with high extension as well as some other data, necessary for the analysis of influence of wave processes on efficient rock cutting are interpreted in the present dissertation.

There were proceeded experiments of different mathematical methods, indicating behavior of KBT during development and drilling-out of rock. The first method discussed and preceded the "Analysis of Torsion Self-oscillations of Drill Pipe Column", pointing the mode of operation instead of self-oscillations regime, when undamped and continuous hunting is arisen, considering that these hunting are induced not by external hunting but by the parameters of the system itself. Such kind of mode is impossible in linear system; that is why this mode is excluded in linearized system. However, practically all systems are nonlinear: some of them admit linearization, some - referred to as actually nonlinear - do not admit the mentioned. For studying the latter it is necessary to discussion of issue of possibility of rise of self-oscillations. The second method - "Running Regime of Drill Pipe Column in the Process of Drilling with the Rock-roller Bit" – pointing that during the drilling-out of rock an oscillation frequency of the chisel centre is so high that after several revolution of chisel influence of origin conditions will became practically unnoticeable; according to this we are going to explore oscillation of drill pipe column without any originating condition. In the third method there was proceed "exploration of torsion oscillation of KBT with the method of end diversities and analogy". One of the most widely distributed approximate methods of solution of differential equation with partial derivatives is the method of end diversities/differences. The main idea of the method concludes that solid body or environment is considered as totality and aggregate of big number of end-difference voluentary unit. Thus. approximation is considered as substitution/equivalent of the system with distributed parameters by set of discrete units in manner that characteristic of virgin system will be remained approximately

unchanged. The forth method is the "Analogy Method". The Fifth method is the "Exploration of Torsion Oscillation of KBT at Spasmodic Increment of the Moment of Resistance on Chisel" The sixth method is the "Stressing Calculation at Torsion Oscillation of the Drilling Pipe Column". Finally, the seventh method is the "Development and Principles of Construction of KBT Model". According to the considered methods, there was selected and consequently taken into consideration the "System of Operation of Boring Rig UBS 501 AK with Electric Drive".

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	20
Глава 1	25
1.1 Основные типы регуляторов применяемых в системах управления	25
электроприводами исполнительных механизмов механизмов буровых	
установок	
1.2 Электропривод ротора	31
1.3 Типовые структуры электротехнических комплексов буровых установок	34
Глава 2.	38
2.1Анализ крутильных автоколебаний колонны бурильных труб (КБТ)	38
2.2 Режимы работы колонны бурильных труб в процессе бурения	46

шарошечными долотами	
2.3 Исследования крутильных колебаний КБТ методом конечных разностей и методом аналогий	54
2.4 Метод аналогий	58
2.5 Исследования крутильных колебаний КБТ при скачкообразном возрастании момента сопротивления на долоте	68
2.6. Определение напряжений при крутильных колебаниях колонны бурильных труб	71
2.7. Разработка и принцип построения модели КБТ	80
Глава З	93
Система управления электроприводом бурового станка УБШ 501 АК	93
3.1.Выбор элементов силовой части электропривода	94
3.1.1 Выбор двигателя	94
3.1.2. Выбор преобразователя частоты	95
3.1.3. Выбор токоограничивающего реактора	98
3.1.4. Расчет общего сопротивления цепи	98
3.1.5. Расчет электромеханической и электромагнитной постоянных времени	100
3.2. Расчет статических и динамических характеристик разомкнутой	101
системы	
3.3. Расчет замкнутой системы по схеме с общим сумматором	104
3.3.1. Расчет жесткой обратной связи по скорости	104
3.3.2 Ограничение форсировок замкнутой системы	105
3.3.3 Статический расчет токовой отсечки	106
3.4. Определение устойчивости системы	109
3.5. Расчёт системы подчинённого регулирования	113
3.5.1. Расчёт обратной связи по току и регулятора тока	113
3.5.2 Расчёт обратной связи по скорости и регулятора скорости	115
3.5.3 Расчет задатчика интенсивности	116

3.5.4 Составление структурной схемы	117
3.6. Разработка узлов электрической защиты электропривода	119
3.6.1 Защита от короткого замыкания	119
3.6.2 Защита от самозапуска или нулевая защита	120
3.7. Составление принципиальной схемы привода	121
Выводы	122

# ცხრილების ნუსხა

77
21
36
95
97

# ნახაზების ნუსხა

	Структура аналогового регулятора, выполненного на	
Рис. 1	операционном усилителе. Схема пропорционального	
	регулятора с управляемым ограничением выходного сигнала.	26
	Характеристика вход-выход регулятора с управляемым	
	ограничением выходного сигнала	
	Структура электротехнического комплекса буровой	
Рис. 2	установки с частотно-регуляруемыми электроприводами	35
	исполнительных механизмов	
D 011	Блок-схема моделирования с помошью программного	41
Рис.2.1.1	расширения Simulink	41
Рис.2.1.2	а) зависимость относительной деформации $\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x}$ от времени	43
	<i>t</i> в сечении 4	
Рис.2.1.2	б) зависимость относительной деформации $\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x}$ от времени	43
	<i>t</i> в сечении 2	
	с) зависимость угла поворота нижнего сечения колонны от	
Рис.2.1.2	времени $\overline{\phi}(\overline{t})$	44
	Зависимость максимального тангенциального напряжения в	
Рис.2.1.3	забойной части колонны $\frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial x}$ от времени $\overline{t}$	45
Рис.2.2.1	Буровая оснастка	46
Рис.2.2.2	а) Динамика колебания КБТ в процессе бурения шарошечными долотами	50
Рис.2.2.2	б) Динамика колебания КБТ в процессе бурения шарошечными долотами	51
	Звено дискретной цепочки с учетом действующих сил,	52
Рис.2.3.1	являющейся аналогом колонны бурильной труб	53

Рис.2.3.2	Элемент упругого стержня		
Рис.2.3.3	Блок-схема набора в программе Simulink	57	
	График изменения $\overline{u(x,t)}$ для $\chi = 0.4$ разных сечений		
Рис.2.4.1	колонны, начиная $x = 0$ с шагом $x = 0.2$	65	
Рис.2.6.1	Схема исследования динамики вращательного движения колонны труб	71	
	Зависимости $\varphi(x,t)$ при различных $x$ (графики напряжений		
Рис.2.6.2	крутильных колебаний КБТ в разных сечения колонны)	76	
Рис.2.6.3	Зависимости $\varphi(x,t)$ при различных $x$ (графики напряжений крутильных колебаний КБТ в разных сечения колонны)	77	
Рис.2.7.1	Принципиальная схема для расчета КБТ	81	
Рис.2.7.2.	Блок-схема модели буровой колонны при $M_{don} = 426,9$ и $n = 4.$	84	
Рис.2.7.3	Зависимость $\omega_i$ от $t$ при $n = 5$ и $M_{don} = 426,9$	85	
Рис.2.7.4	Зависимости $\omega_i$ от $t$ а) $n = 5$ и $M_{\partial o_i} = 426,9$	86	
Рис.2.7.4	Зависимости $\omega_i$ от $t$ б) при $n = 5$ $M_{\partial on} = 853,7$	86	
Рис.2.7.4	Зависимости $\omega_i$ от <i>t</i> в) $n = 5$ $M_{\partial o_i} = 1280, 6$	87	
Рис.2.7.4	Зависимости $\omega_i$ от <i>t</i> г) при <i>n</i> = 4 $M_{\partial on} = 1707,5$	87	
Рис.2.7.5.	Блок-схема модели буровой колонны при $M_{\scriptscriptstyle \partial on} = 426,9$ и $n$ =7	88	
Рис. 2.7.6	Зависимость $\omega_i$ от <i>t</i> при <i>n</i> =7 $M_{\partial on}$ = 426,9	88	
Рис.2.7.7.	Зависимость $\omega_i$ от $t$ . a) при $n$ =13;	91	
Рис.2.7.7.	Зависимость $\omega_i$ от $t$ . б) при $n = 11$	91	
Рис.2.7.7.	Зависимость $\omega_i$ от $t$ . в) при $n = 15$	92	
Рис.3.2.1.	Структурная схема разомкнутой системы	102	
Рис.3.2.2.	Переходной процесс по току в разомкнутой системе	102	
Рис.3.2.3	Переходной процесс по скорости в разомкнутой системе	103	

Рис.3.2.4.	Статические характеристики разомкнутой системы	103
Рис.3.3.1	Структурная схема замкнутой системы	104
Рис.3.3.2	Общий вид датчика тока	106
Рис.3.4.1.	Упрощенная структурная схема замкнутой системы	109
Рис.3.4.2.	График переходного процесса по скорости в относительных единицах, полученный аналитически	110
Рис.3.4.3.	Структурная схема замкнутой системы с общим сумматором .	111
Рис.3.4.4.	Переходной процесс по скорости в замкнутой системе по схеме с общим сумматором	111
Рис.3.4.5	Переходной процесс по току в замкнутой системе по схеме с общим сумматором	112
Рис3.4.6.	Статические характеристики в замкнутой системе по схеме с общим сумматором	112
Рис.3.5.1.	Принципиальная схема регулятора тока	114
Рис.3.5.2.	Принципиальная схема регулятора скорости	115
Рис.3.5.3.	Структурная схема замкнутой системы подчиненного регулирования	117
Рис.3.5.4.	Переходной процесс по скорости в системе с подчиненным регулированием.	117
Рис.3.5.5.	Переходной процесс по току в системе с подчиненным регулированием	118
Рис.3.5.6.	Статические характеристики в системе подчиненного регулирования с регулятором скорости, синтезированным по модульному оптимуму	118
Рис.3.5.7.	Статические характеристики в системе подчиненного регулирования с регулятором скорости, синтезированным по симметричному оптимуму	119
Рис3.6.1.	Принципиальная схема возможной реализации защиты АД	120
Рис.3.7.1.	Тринципиальная схема привода	121

# დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები

- КБТ колонна бурильных труб
- ШИМ широтно-импульсная модуляция
- БУ буровая установка
- ОУ операционный усилитель
- ИМС интегральные микросхемы
- ГИС гибридные интегральные схемы
- БИС большие интегральные схемы
- ПУЭ правила устройства электроустановок
- ЭТК электротехнический комплекс
- ПЧ преобразователь частоты
- АД асинхронный двигатель
- ОС обратная связь
- ДТ датчик тока
- ЭДС электродвижущая сила
- ЗИ задатчик интенсивности

# მადლიერება

არ შემიძლია არ გამოვხატო მადლიერება ყველა იმ პირთა მიმართ ვინც ფიზიკურად თუ მორალურად მხარში მედგა მთელი ის პერიოდი, სანამ ამ სადირსეტაციო ნაშრომს დავასრულებდი.

უპირველეს ყოვლისა უღრმესად მადლიერი ვარ ჩემი ხელმძღვანელის, ბატონი გივი მაჩაბლის და ნინო მჭედლიშვილს, რომელმაც უდიდესი წვლილი მიუძღვის ჩემი ნაშრომის ამ სახით წარმოდგენაში, ადამიანებს, რომლებსაც გააჩნიათ დიდი მეცნიერული ალღო და გამოცდილება, პასუხისმგებლობის მაღალი გრძნობა, დადებითი პიროვნული თვისებები, მომთხოვნი და მტკიცე ხასიათი, გამოირჩევიან ლიდერული თვისეზეზით, გამჭრიახი გონებით, არნახული ენერგიულობითა და შრომისმოყვარეობით. აღნიშნული პიროვნებები მთელი ამ ხნის განმავლობაში არ ზოგავდნენ არც დროს და არც ენერგიას, ჩემს შემოქმედებით გაზრდასა და განვითარებაში. ნამდვილად დიდი მადლიერი ვიქნები მათი მთელი ცხოვრების განმავლობაში.

ჩემი ხელმძღვანელების შემდეგ ყველაზე დიდი მადლიერი ვარ ჩემი ოჯახის წევრების - ჩემი მშობლების და დის, რომლებიც ყველანაირად მიწყობდნენ ხელს და მიქმნიდნენ პირობებს, იმისათვის, რომ ნაყოფიერად მემუშავა და დროულად დამემთავრებინა ნაშრომი.

მადლობას ვუხდი ჩემთვის მალიან ახლობელსა და საყვარელ ადამიანებს, ჩემს თანამშრომლებს, რომლებიც მთელი ამ ხნის განმავლობაში მხარში მედგნენ, მაძლევდნენ სასარგებლო რჩევებს და სამუშაო პირობებს მიქმნიდნენ.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все ведущие электротехнические фирмы выпускают регулируемые электроприводы комплектно с компьютерными средствами автоматизации в виде гибко программируемых систем, адаптируемых к широкой области их применения.

Область применения различных типов регулируемых электроприводов в значительной степени определяется применяемой элементной базой силовых полупроводниковых преобразователей энергии. В связи с освоением промышленностью полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов в модульном исполнении: мощных полевых транзисторов (MOSFET), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) запираемых тиристоров с интегрированным управлением (IGCT) и запираемых тиристоров (GTO) разработаны полупроводниковые преобразователи, обеспечивающие плавное и экономичное регулирование скорости электродвигателей в широком диапазоне. На базе выпускаемых силовых полупроводниковых модулей создаются регулируемые электроприводы по системе преобразователь частоты – асинхронный короткозамкнутый двигатель (ПЧ - АД).

При помощи электропривода до 1 МВт для создания ПЧ в настоящее время используются модули IGBT, более 1 МВт модули GTO или IGCT.

Создание надёжных статистических преобразователей частоты для управления асинхронными электродвигателями с использованием средств микропроцессорной техники привело к массовому применению электроприводов по системе ПЧ – АД в различных отраслях промышленности. Разработки в области частотно-регулируемых электроприводов нашли применение В электроприводах исполнительных механизмов ряда зарубежных буровых установок наземного и морского бурения.

С середины 90-х годов компанией ABB начата комплектная поставка электрооборудования для БУ с частотно - регулируемыми электроприводами. В комплект входят электроприводы буровой лебедки, буровых насосов, верхнего привода (или ротора), а на морских БУ также якорных лебедок и гребных винтов. В качестве приводных двигателей применены асинхронные короткозамкнутые двигатели типа HXR, разработанные специально для использования в частотно-регулируемых электроприводах и приспособленные к условиям бурения. Электродвигатели – малошумные, с низким уровнем вибрации, с принудительной вентиляцией мощностью до 1400 кВт, не требующие водяного охлаждения.

Каждый привод имеет индивидуальный инвертор, работа которого основана на принципе широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Инверторы построены по мостовой трёхфазной схеме, состоящей из шерсти полупроводниковых ключей.

## Преимущества при применении частотно-регулируемого электропривода

### переменного тока

Технологический Приводная		Преимущества при приме-	
механизм и его	мощность	нении регулируемого электро-	
назначение		привода переменного тока	
Буровой насос для	От 300 до 1180	Наилучшее использование	
создания циркуляции	кВт	усиановленной мощности и	
промывочной жид-		работа в оптимальных режимах	
кости в скважине		для каждого интервала бурения	
		Увелечение частоты вращения	
		долота, средней мощности,	
		подводимой к долоту	
		Возможность пуска насоса под	
		нагрузкой	
		Облегчение восстановления	
		циркуляции, сокращение затрат	
		времени на промывку	
		скважины	
		Уменьшение числа рейсов в	
		связи с увелечением средней	
		проходки на долото	
Буровая лебедка для	Для подъёма: от	Повышение производительно-	
подъёма инструмента	320 до 1000 кВт	сти спуско-подъёмных опера-	
и подачи долота на		ций	
забой		Сокращение числа механи-	
		ческих передач	
		Повышение надёжности меха-	
		нического оборудования	

		Сокращение энергетических	
		затрат	
		Автоматическое регулирование	
		подачи долота с помощью	
		регулятора активного типа не	
		может быть реализовано без	
		использования полноупра-	
		вляемого электропривода	
Ротор для передачи	От 150 до 500	Повышение механической и	
энергии долоту с	кВт	рейсовой скорости бурения	
поверхности через		Ограничение напряжений в	
колонну бурильных		трубах и защита от поломок	
труб и производства			
вспомогательных			
операций при бурении			
Комплект вспомо-	Суммарная	Выбор оптимального техноло-	
гательных механизмов	установленная	гического режима	
для механизации тру-	мощность	Сокращение энергетических	
доёмких процессов. В	электро-	затрат	
том числе пескоот-	оборудования	Оперативное регулирование	
делитель ПГ60/300;	циркуляционной	физических свойств бурового	
илоотделитель	системы от 200	раствора	
ИГ45/75;	до 770 кВт,		
ситогидроциклонный	потребляемая		
сепаратор СГО 45/150	мощность не		
или 65/300; гидроцик-	более 360 кВт		
лонный глиноотде-			

литель ГУР-2; насос-	
ный агрегат блока	
приготовления и	
обработки бурового	
раствора	

Каждый инвертор имеет свою собственную микропроцессорную систему управления. Для управления системой имеется контроллёр прикладного программного обеспечения, позволяющий одновременно управлять несколькими инверторами. Статистическая точность регулирования частоты вращения с обратной связью от импульсного датчика – 0,01 %; без обратной связи от 0,5 до 3 %ю указанные типы частотно-регулируемого электропривода нашли широкое применение на БУ месторождений Северного моря.

С 1998 г. компанией ABB поставляются многодвигательные асинхронные частотно-регулируемые электроприводы типа ACS600 Multi Drive. Компанией ABB освоена также серия высоковольтных частотнорегулируемых электроприводов мощностью от 315 до 5000 кВт серий ACS1000. В качестве ключевых элементов в инвенторах этой серии используются модули IGCT.

По сравнению с электроприводом по системе ТП – Д, частотнорегулируемый электропривод обладает следующими преимуществами:

сокращение массы и габаритов электрооборудования;

проще решфется проблема обеспчения взрывозащиты электродвигателя;

более высокая точность регулироавния скорости;

за счёт прямого управления моментом достигаются требуемые показатели качества функционирования электропривода в динамических режимах;

уменьшение динамических нагрузок в КБТ и передаточном механизме, поскольку момент инерции ротора асинхронного короткозамкнутого

двигателя значительно меньше момента инерции ротора двигателя постоянного тока;

более простыми средствами обеспечиваются сопряжение локальных систем автоматики с системой управления вернего уровня;

повышается надёжность и долговечность электропривода, работающего в тяжёлых условиях эксплуатации;

благодаря встроенной системе диагностики сокращаются затраты на техническое обслуживание и простои технологического оборудования;

более высокое значение КПД за счёт применения в преобразователях полупроводниковых приборов нового поколения с малыми внутренними потерями энергии и др.

### Глава 1.

# 1.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Аналоговые регуляторы в системах подчинённого управления электроприводами строятся на основе операционных усилий (ОУ) – усилителей постоянного тока с высоким выходом и очень низким выходным сопротивлениями. Технология интегральных микросхем позволяет в настоящее время изготавливать высококачественные и недорогие ОУ. В некоторой части своего рабочего диапазона ОУ ведёт себя как линейный усилитель напряжения с очень большим коэффициентом усиления (10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup>). Если в схеме ОУ не предусмотрена отрицательная обратная связь с выхода на вход, то из-за высокого коэффициента усиления, он обязательно подаёт в режим насыщения. Поэтому схемы регулятора на базе ОУ содержат отрицательную обратную связь.

Операционный усилитель получил своё название благодаря тому, что с его помощью могут выполняться различные математические операции, такие как умножение, суммирование, интегрирование и дифференцирование. Типовые регуляторы строятся на базе инвертирующего усилителя, причём входные и выходные цепи, кроме сопротивлений, могут содержать ёмкости.

Поскольку коэффициент усиления ОУ велик (K<sub>y</sub> = 10<sup>5</sup>/10<sup>6</sup>), а выходное напряжение U<sub>вых</sub> ограничено напряжением питания U<sub>п</sub>, то потенциал точки A (рис.1.1 а)  $\phi_A = U_{\text{вых}}$  K<sub>y</sub> близок к нулю, т.е. точка A выполняет функцию кажущейся земли (заземлять точка A нельзя, иначе схема неработоспособной).



Структура аналогового регулятора, выполненного на операционном усилителе (<sup>‡</sup>). Схема пропорционального регулятора с управляемым ограничением выходного сигнала (·). Характеристика вход-выход регулятора с управляемым ограничением выходного сигнала (,)

Рис. 1.1

В связи с изложением можно записать

 $I_{\text{BX}}(p) = -I_{\text{oc}}(p)$ 

или

$$\frac{U_{\text{BX}}(p) = -U_{\text{BEIX}}(p)}{Z_{\text{BX}}(p) = -Z_{\text{oc}}(p)}$$

откуда

 $\underline{U}_{\text{bbix}}(\underline{p}) = -\underline{Z}_{\text{oc}}(\underline{p})$   $U_{\text{bx}}(\underline{p}) = -\underline{Z}_{\text{bx}}(\underline{p})$ 

Полученное соотношение испльзуется для синтеза регулятора с требуемой передаточной функцией. Синтез сводится к выбору типов и значений входных сопротивлений Z<sub>вх</sub> (р) и сопротивления Z<sub>oc</sub> (р).

Схемы, передаточные функции и переходные функции регуляторов различных типов приведены в табл. 1.1.

CACHAR & ABBARB SECREE AUPARICPECTERE PERMI TELES PERMISOPOL				
Тип регулятора	Схемы регулятора	Передаточная функция регулятора	Переходная функция регулятора	
Пропорциональ- ный (П)		$W_{\mathbf{p}}(p) = \frac{R_{0}}{R_{1}} = K_{\mathbf{p}}$		
Интегральный (И)		$W_{p}(p) = \frac{I}{\tau_{p}} = \frac{K_{p}}{p}$ $\tau = R_{1}C$ $K_{p} = \frac{I}{\tau}$		
Дифференциаль- ный (Д)		$W_{p}(p) = \tau p = K_{p} p$ $\tau = K_{p} = R_{0} C$		

Схемы в двнамические характеристики различных типов регуляторов

Табл. 1.1

Для получения пропорционального регулятора (П-регулятор) на вход и цепь обратной связи ОУ включают резисторы; интегрального регулятора (И- регулятора) во входную цель резистор, а в цепь обратной связи – конденсатор; ПИ- регулятора во входную цепь-резистор, а в цепь обратной связи – последовательно соединенные резистор и конденсатор. ПИДрегулятор может быть выполнен на одном усилителе с помощью активноёмкостных цепей на входе и в цепи обратной связи.



Промышленностью выпускаются различные типы операционных усилителей на интегральных микросхемах (ИМС) – как круглой, так и прямолинейной формы. Наибольшее распространение для построения регуляторов получили ОУ типов К14 ОУД7, К553УД2, К157УД2 и др.

Уменьшить размеры и повысить надёжность устройств аналоговых систем управления электроприводами можно при внедрении гибридной технологии для их изготовления. При изготовлении гибридных интегральных схем (ГИС) активные элементы(ОУ) устанавливаются печатной

плате в твёрдотельном (бескорпусном) исполнении, а конденсаторы и резисторы – методом плёночной технологии (напылением плёнок из проводящих, полупроводящих и непроводящих материалов). Полученный модуль может быть залит компаундном или помещён в корпус.

Ограничение координат электропривода (тока, скорости и др.) осуществляется включением в структуру регулятора внешнего контура регулирования узлов ограничения. Последние могут быть управляемыми и не управляемыми. На рис.1.1 (б) приведена схема ограничения выходного напряжения пропорционального регулятора с отсекающими диодами VD1, VD2 и управляемым опорным напряжением Uon. Схема позволяет получить несимметричную относительно начала координат вход-выход с различным уровнем ограничиваемого выходного напряжения рис.1.1. Возможны и другие варианты схем управляемого ограничения выходного напряжения ОУ с использованием транзисторов.

До последнего времени в автоматизированном электроприводе исполнительных механизмов отечественных буровых установок основные применения получили средство аналоговой вычислительной техники. За последние годы рядом проектных и научно-исследовательских организаций ведутся работы по созданию микропроцессорных систем управления. По сравнению с аналоговыми системами микропроцессорные системы обладают рядом преимуществ. отметим некоторые из них.

Гибкость. Возможность путём перепрограммирования и изменения не только параметров системы управления, но и алгоритмов и даже структуры. При этом аппаратная часть системы остаётся неизменной. В аналоговых системах потребовалось перекомпоновка аппаратной части. Программное обеспечение микроЭВМ можно легко корректировать как в предпусковой период, так и в процессе их эксплуатации. Благодаря этому снижаются затраты и сроки провидения наладочных работ и изменяется их характер, поскольку необходимые эксперименты по определению характеристик и

параметров, а также настройка регуляторов могут быть произведены автоматически самой микроЭВМ по заранее подготовленной программе.

Снятие всех ограничений на структуру управляющего устройства и законы управления. При этом показатели качества цифровых систем могут значительно превышать показатели качества управления непрерывных систем управления. Путём введения соответствующих программ могут быть реализованы сложные законы управления (оптимизация. адаптация, прогнозирование и др.), в том числе и такие, которые весьма сложно осуществить с помощью аналоговых средств. Появляется возможность решения интеллектуальных задач, обеспечивающих правильность И эффективность ведения технологических процессов. На основе микроЭВМ могут быть построены системы любых типов, включая системы с подчинённым управлением, многомерные системы с перекрёстными связями и др.

Самодиагностика И самотестирование цифровых управляющих устройств. Возможность проверки исправности механических узлов привода, силовых преобразователей, датчиков и другого оборудования во время технологических автоматическая диагностика пауз, т.е. состояния оборудования и раннее предупреждение аварий. Эти возможности дополняются развитыми средствами борьбы с помехами. Главное здесь замена передачи информации цифровыми содержащими аналоговых линий гальванические развязки, волокно-оптические каналы, помехоустойчивые интегральные микросхемы в качестве усилителей и коммутаторов.

Более высокая точность вследствие отсутствия дрейфа нуля, характерно для аналоговых устройств. Так, цифровые системы регулирования скорости электропривода могут обеспечить повышение точности регулирования на два порядка по сравнению с аналоговыми.

Простота визуализации параметров процесса управления путём применения цифровых индикаторов, индикаторных панелей и дисплеев, организации диалогового режима обмена информацией с оператором.

Большая надёжность, меньшие габариты, масса и стоимость. Высокая надёжность микроЭВМ по сравнению с аналоговой техникой обеспечивается применением больших интегральных микросхем (БИС), наличием специальных систем защиты памяти, помехозащищённости и другими средствами. Благодаря высокому уровню технологии производства БИС снижаются затраты на изготовление систем управления электроприводами. Эти преимущества особо проявляются при использовании оплатных и однокристальных ЭВМ.

#### 1.2. ЭЛЕКТРОПРИВОД РОТОРА

Основным способом проходки нефтяных и газовых скважин в настоящее время является вращательное бурение. Долото, находящееся на нижнем конце колонны бурильных труб (КБТ) и создающие усилие на забой скважины за счёт части веса КБТ, при его вращении разрушает породу и обеспечивает уголубление скважины. Разрушению породы способствует также гидромониторное действие струй бурового раствора. истекающих под давлением из отверстий насадок долота.

Устройства для приведения долота во вращение делятся на две группы:

наземные устройства, осуществляющие вращение всей КБТ и жёстко связанного с ней долота – буровой ротор или силовой вертлюг (верхний привод) со своими системами привода;

забойные двигатели гидравлические (турбобур. винтовой двигатель) и электрические (электробуры).

Основным наземным механизмом для привода долота является буровой ротор. Важная особенность наземных приводов КБТ и долота состоит в том, что скорость привода может достаточно просто регулироваться различными способами (с помощью механических многоскоростных передач, регулируемого электропривода и т.д.). При этом могут быть получены низкие скорости при высоких значениях момента.

Гидравлические двигатели приводятся в движение потоком бурового раствора. В течение многих десятилетий для бурения нефтяных и газовых скважин применяются турбобур, представляющий собой многоступенчатую гидротурбину, приводящую во вращение долото. Рабочая частота вращения вала турбобура относительно высокав и составляет сотни оборотов в минуту. в связи с чем для турбинного бурения характерны высокие механические скорости, но пониженная проходка на долото.

За последние годы находят применение винтовые забойные двигатели, относящиеся к гилравлическим машинам объёмного действия. Они характеризуются значительно частотой вращения вала, что обеспечивает достаточно высокую механическую скорость бурения и более высокую чем турбобур проходку на долото.

Передача энергии долоту с поверхности через наземные передаточные механизмы КБТ вызывает значительные потери мощности и сильно снижает КПД всего процесса бурения, особенно когда глубин скважины достигает 4-5 тыс. м.

В процессе бурения неоднородных пород момент сопротивления на долоте непрерывно меняется. Наиболее сильно колебания момента выражены при долотах режущего типа, меньше – при шарошечных долотах. Колебания момента сопротивления на долоте передаются по КБТ приводному двигателю ротора в виде упругих волн кручения, продольных

колебаний и других возмущений, распространяющихся в стальных трубах со скоростью около 3 км/с.

В результате отражения волн кручения, вызванных заклиниванием долота, напряжения кручения, могут вызывать поломку КБТ. Исследованиями установлено, что напряжения кручения в КБТ при мягкой механической характеристике привода будут меньше, чем при жёсткой. Таким образом, с точки зрения ограничения напряжений в КБТ и защиты её от поломок следует отдавать предпочтение приводу с мягкой механической характеристикой.

При заклинании долота, когда низ КБТ неподвижен, а ротор продолжает вращаться, закручивая трубы, момент двигателя может достигнуть своего максимального значения. Чтобы ограничить возникающие при этом напряжения кручения в КБТ, следует ограничить момент, передаваемый от двигателя ротору. Этого можно достигнуть, применяя двигатели со сравнительно небольшой кратностью максимального момента λ ≤ 1.6/1.8 или используя в приводе ротора средства ограничения момента.

С заклиниванием долота связан также процесс передачи КБТ кинетической энергии, запасённой во вращающихся частях поверхностного оборудования привода ротора. Для уменьшения кинетической энергии, передаваемой КБТ, целесообразно иметь привод ротора с минимальным моментом инерции вращающихся частей.

На основании изложенного выбор привода ротора и его характеристик должен производиться с учётом следующих требований и технологических особенностей:

режим работы привода продолжительный с изменяющимся моментом сопротивления при бурении пород различной твёрдости;

привод должен иметь мягкую механическую характеристику на участке от наминального до стопорного режима;

стопорный (максимальный) момент должен быть ограничен на уровне 1,6 – 1,8 от номинального значения;

для ограничения динамических нагрузок в КБТ привод по возможности должен иметь минимальный момент инерции, приведённый к оси КБТ;

для реализации оптимальных режимов бурения желательно регулирование частоты вращения в широком диапазоне: от 100 – 500 об/мин (реже бывает 200 об/мин) при проходке верхних интервалов скважины и до 20 об/мин на больших глубинах;

при регулировании частоты вращения вниз от номинальной, провод должен обеспечивать длительную работу при номинальном моменте нагрузки (регулирование с постоянным моментом), а при регулировании частоты вращения вверх от номинальной должен обеспечивать регулирование с постоянной мощностью, не превышающую номинальную;

привод должен быть реверсивным, однако, реверс неоперативный;

в основных рабочих режимах ротор вращается только в прямом направлении (по часовой стрелке), обратное вращение требуется лишь при выполнении некоторых вспомогательных операций и в аварийных режимах, поэтому возможны оперативные переключения с кратковременным перерывом питания. При турбинном бурении ротор часто использует для вращения КБТ с малой частотой вращения, что предотвращает «зависание» КБТ в скважине и способствует улучшению процесса бурения. С помощью ротора выполняется раскрепление резьбовых соединений труб и др.

## 1.3. ТИПОВЫЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) электрифицированные буровые установки (эл приводом основных исполнительных механизмов) при бурении на глубину более 4500 м и в

сложных геологических условиях на меньшую глубину, а также буровые установки на море относятся к потребителям первой категории.

Буровые установки при бурении до 4500 м в несложных геологических условиях относятся к потребителям второй категории. Несмотря на многообразие структурных схем буровых установок, предопределённое широким спектром требований к глубинам бурения (только по этому параметру ГОСТ 16923-89 различает 11 классов), назначению и условиям эксплуатации, их число может быть ограничено типовыми структурами электротехнических комплексов (ЭТК), применение которых на установках различных исполнений сводится в основном к количественному изменению параметров используемого электрооборудования.

На рис.2 изображена структура электротехнического комплекса буровой установки с частотно-регулируемыми электроприводами исполнительных механизмов. Работы по созданию буровых установок с частотнорегулируемыми электроприводами находятся в России в стадии исследовательских работ.

С 1998 г. компанией ABB налажен выпуск системы многодвигательных асинхронных частотно-регулируемых электроприводов под фирменным обозначением ASC 600 Multi Drive. Структура многодвигательного электропривода с общим звеном постоянного тока изображена на рис. 6,13.

Частотно-регулируемые электроприводы исполнительных механизмов буровых установок нашли широкое применение на технологических установках, ведущих эксплуатацию месторождений углеводородного сырья в акватории Северного моря.



Структура электротехнического комплекса буровой установки с частотно-регулируемыми электроприводами исполнительных механизмов: G — генераторы постоянного тока или переменного тока; ПЧ — преобразователи частоты; остальные обозначения см. на рис. 6.10

### Рис. 1.3.

Корпорацией Триол (г. Москва) разработаны частотно-регулируемые электроприводы Триол АТО8, предназначенные для управления технологическими установками, приводом которых служат асинхронные электродвигатели с напряжением 660 В. Ряд АТО8 содержит 6 типов исполнений приводов мощностью 132, 160, 200, 250, 320, 450 кВт. Электроприводы обеспечивают следующие режимы работы исполнительных механизмов:

плавный частотный пуск;

длительный режимы работы в заданном диапазоне регулирования скорости;

автоматическое регулирование скорости и других параметров;

рекуперативное, динамическое торможение и останов;

реверсирование;

защиту электрического и механического оборудования.

Электроприводы АТО8 могут быть использованы для буровых установок.
#### Таблица 2. Основные параметры и характеристики АТО8

Питающая сеть	3. 660 В, + 10% - 15%, 50(60) Гц
Выходное напряжение	3. (0660 B) <u>+</u> 2%
Выходная частота	050(100) Гц <u>+</u> 0,05%
Тип перегрузки	150% номинального значения
	в течение 60 с
КПД, не менне	0,97 (без двигателя)
Коэффициент мощности (сети), не ниже	0,95

Электропривод сохраняет работоспособное состояние при кратковременных отклонениях напряжения питающей сети на 40%. Климатическое исполнение УХЛ4 либо УХЛ3. Степень защиты IP21 или IP54 (в зависимости от типа).

В состав электропривода АТО8 входят:

шкаф электропривода с силовым преобразователем частоты, системой управления, защиты и сигнализации;

пульт дистанционного управления;

блок выходного фильтра ограничения напряжения на двигателе;

блок тормозного резистора.

В преобразователях частоты и других устройств использованы диоднотиристорные и транзисторные IGBT-модули на напряжение 1700,1800 В. Управление электроприводом осуществляется с помощью микроконтроллёра.

### Глава 2.

## 2.1 Анализ крутильных автоколебаний колонны бурильных труб (КБТ).

В нелинейных системах может иметь место режим автоколебаний, когда в системе возникают незатухающие периодические колебания, вызванные не внешними периодическими воздействиями, а параметрами самой системы. Такой режим не возможен в линейных системах и поэтому и в линеаризованных системах этот режим исключается. Однако практически все системы являются нелинейными: одни допускают линеаризацию, а другие, называемые существенно нелинейными, не допускают. При изучении последних является необходимым рассмотрение вопроса возможности возникновения автоколебаний. Автоколебательные системы чрезвычайно распространены. Таковыми являются периодические фонтанирование скважины, колебания алмазных долот истирающе-репсущего типа, колебания колонны бурильных труб при ее подъеме или вращении в наклонной скважине и т.д.. Автоколебания могут быть почти гармоническими и релаксационными. Почти гармонические колебания близки к синусоидальным. Релаксационные автоколебания, характеризуются разрывной функцией. Релаксационные автоколебание обусловленные наличием сухого трения, имеют место в случае, когда различаются трение покоя и трение движения.

Применение алмазных долот и долот истирающе-режущего типа при определенных условиях может явиться причиной возникновения автоколебаний низа колонны бурильных труб. В частности, возникновение крутильных автоколебаний системы колонна-долото может быть обусловлена нелинейной характеристикой момента трения между долотом и разбуриваемой породой [2].

Релаксационные автоколебания колонны бурильных труб отрицательно влияют на прочностные характеристики, поскольку здесь может иметь место усталостное разрушение.Изучение причин возникновения автоколебаний позволит выбрать рациональный режим бурения и компоновку низа колонны бурильных труб с целью уменьшения динамических нагрузок.

Пусть скважина «вертикальна» и заполнена глинистым раствором. Колонна с утяжеленными бурильными трубами рассматривается как однородный квазиодномерный стержень со сосредоточенной массой в нижнем сечении. Верхнее сечение колонны вращается ротором с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Закон движения нижнего сечения определяется взаимодействием долота с породой. Долото находится в покое, пока момент внутренних сил не превзойдет момента трения между долотом и забоем. При достижении равенства моментов происходит отрыв долота от породы. Предполагается, что скорость вращения нижнего сечения колонны не меняет знака; в характеристике трения различают моменты тренитя покоя и движения, причем если при  $\frac{\partial \varphi}{\partial t}\Big|_{x=t_1} = 0$  момент трения  $M = M^*$ , то при

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|_{x=l_1} \neq 0 \qquad M = \beta M^*,$$
где  $\beta < 1$ .

Задача о крутильных колебаниях колонны бурильных труб имеет вид [2]

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} &= a^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - 2v \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ a^2 &= \frac{GI_0}{I} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t}\Big|_{x=0} &= \omega_0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t}\Big|_{x=0} &= e(S)S(\varphi_x, M) \\ S(\varphi_x, M) &= \int_0^t \left[ -\frac{GI_0}{I_2} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=l_1} - \frac{M^*}{I_2} e_1 \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{x=l_1} \right) \right] dt \\ e(s) &= \begin{cases} 0, s \le 0 \\ 1, s > 0 \end{cases} \\ e_1 \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{x=l_1} \right) &= \begin{cases} 1, \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{x=l_1} &= 0 \\ \beta < 1, \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{x=l_1} &\neq 0 \end{cases} \tag{2.1.1} \\ \varphi(x, t)_{t=0} &= 0; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{t=0} &= 0 \end{aligned}$$

где  $\varphi$  – угол закручивания; G-модуль сдвига;  $I_0$ -полярный момент инерции сечения труб; I – момент инерции колонны бурильных труб относительно оси симетрии, отнесенный к единице длины;  $I_2$  – момент инерции утяжеленных бурильных труб;  $M^*$  – момент трения между долотом и породой; v – коэф-фициент сопротивления ;  $l_1$  – длина колонны.

Как видим, модель представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных. Одним из наиболее распространенных приближенных методов решения таких уравнений является метод конечных разностей. Основная идея метода заключается в конечно-разностной аппроксимаций, сплошная область изменения аргументов заменяется сеткой, в узлах которой рассматривается поведение искомой функции. При этом все производные заменяются разностными соотношениями и выражаются через функции в соседних узлах. Таким подходом дифференциальное уравнение в частных производных заменяется системой алгебраических уравений.

При реализации исследуемой задачи на ЭВМ применяется метод прямых, при котором осуществляется аппроксимация производных по пространственной координате, а производные по времени остаются неизмененными. Применение метода прямых состоит в следующем: колонна бурильных труб разбивается на сечения, где сосредоточены массы и силы, распределенные по соответствущему участку. Последние предполагаются соединенными между собой связями.

Реализуем метод прямых при  $(x_i - x_{i-1}) = \Delta x = \frac{l_1}{n}$  и введем безразмерные переменные:  $\varphi = M_1 \overline{\varphi}, t = M_2 \overline{t}$ . Тогда (2.1.1) примут вид [2]:

$$\frac{d^2 \overline{\varphi_i}}{d\overline{t}^2} = \left(\overline{\varphi_{i+1}} - \overline{\varphi_i}\right) - \left(\overline{\varphi_i} - \overline{\varphi_{i-1}}\right) \chi \frac{d\overline{\varphi_i}}{d\overline{t}} , \qquad i = 1...(n-1)$$
(2.1.2)

$$\frac{d\overline{\varphi}_0}{d\overline{t}} = 1 \tag{2.1.3}$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_n}{d\bar{t}} = e(S_n)S_n(\overline{\varphi}_x, M) \\ S_n(\overline{\varphi}_x, M) = \chi_1 \int_0^t \left[ -(\overline{\varphi}_n - \overline{\varphi}_{n-1}) - \chi_2 e\left(\frac{d\overline{\varphi}_n}{dt}\right) \right] dt \\ e(S_n) = \begin{cases} 0, S_n \le 0 \\ 1, S_n > 0 \\ 1, S_n > 0 \end{cases} \end{cases}$$
(2.1.4)  
$$e_1\left(\frac{d\overline{\varphi}_n}{dt}\right) = \begin{cases} 1, \frac{d\overline{\varphi}_n}{d\bar{t}} = 0 \\ \beta < 1, \frac{d\overline{\varphi}_n}{d\bar{t}} \neq 0 \end{cases}$$

$$\overline{\varphi}_i\Big|_{\overline{i}=0} = 0; \frac{d\overline{\varphi}_i}{d\overline{i}}\Big|_{\overline{i}=0} = 0$$
(2.1.5)

$$\chi = \frac{1}{n} \chi^*; \chi_1 = \frac{1}{n} \chi_1^*; \chi^* = \frac{2\nu l_1}{a};$$
  

$$\chi_1^* = \frac{GI_0 l_1}{I_2 a^2}; \chi_2 = \frac{M^* a}{GI_0 \omega_0}; M_1 = \frac{l_1 \omega_0}{an}; M_2 = \frac{l_1}{an}$$
(2.1.6)

Решаем задачу в компьютерной системе Матлаб. Составляем блок-схему моделирования с помощью програмного расширения Simulink (рис.2.1.1).



Рис.2.1.1.

Схема составляется таким образом, чтобы можно было наблюдать изменения относительной деформации в каждом сечении, которая пропорциональна тагенциальному напряжению. При этом:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \approx \left(\varphi_i - \varphi_{i-1}\right).$$

Изменением величин безразмерных параметров  $\chi_1^*$  и  $\chi_2$  можно моделировать различные условия, имеющие место при роторном бурении.

Для качественной оценки автоколебаний и выяснения возможности их устранения решения задачи на ЭВМ; вначале возьмем *n*=5. В дальнейшем можно увеличить *n*.

Исследован гипотетический объект со следующими данными:  $x = 0.1; x_1 = 2; x_2 = 1;$   $M_v = 955 H \cdot M$  $M = 477.5000 H \cdot M$   $G = 8.0000e+010 H / M^{2}$   $I_{0} = 8.9100e-006 H \cdot M \cdot c^{2}$  a = 3160 M n = 5  $l_{1} = 5000 M$   $n_{u} = 0.0022$   $x_{2} = 1$  $w_{0} = 2.1169 \text{ рад/с}$ 

Результаты моделирования показаны на рис.2.1.2, в котором приведены в безразмерной форме графики изменения относительной деформации, угловой скорости и угла поворота нижнего сечения колонны при  $x_1^* = 10$  и  $x_2 = 1$ . На рис 2.1.2. представлены графики зависимости  $\frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial x}$  от  $\overline{t}$  в двух сечениях и  $\overline{\varphi}$  от  $\overline{t}$ .



а) зависимость относительной деформации  $\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x}$  от времени  $\overline{t}$  в сечении 4,



б) зависимость относительной деформации  $\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x}$  от времени  $\overline{t}$  в сечении 2,





### Рис.2.1.2

Известно, что с началом вращения ротора в колонне появляются крутильные деформации и накапливается потенциальная энергия, поскольку долото остается в покое до тех пор, пока крутящий момент в нижнем сечении не превзойдет момента сопротивления. При достижении равенства моментов происходит отрыв долота от породы. В связи с нелинейным характером зависимости момента сопротивления от относительной скорости трущихся поверхностей долота и породы происходит скачкообразное увеличение скорости вращения долота, сопровождающееся падением напряжения в нижнем сечении колонны. Последнее влечет за собой уменьшение скорости вращения долота вплоть до его заклинивания. Таким образом, процесс релаксационных автоколебаний повторяется.

Однако при определенных условиях можно избежать возникновения релаксационных автоколебаний. Меняя значение коэффициентов  $\chi_1$  и  $\chi_2$  можно добиться, чтобы снизить или вообще погасить автоколебания (рис.2.1.3).



Рис.2.1.3.

Зависимость максимального тангенциального напряжения в забойной части

колонны 
$$\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x}$$
 от времени  $\overline{t}$ .

# 2.2 Режимы работы колонны бурильных труб в процессе бурения шарошечными долотами.

В процессе разбуривания породы частота колебаний центра долота настолько высока, что после нескольких оборотов долота влияние начальных условий практически будет незаметным, поэтому будем исследовать колебания колонны бурильных труб без начальных условий.

Буровая оснастка принимается [2] состоящей из пружины (1), имитирующей талевой канат, с приведенной жесткостью *с*; сосредоточенной массы m (2), имитирующей поступательно-движущиеся элементы талевой системы (крюк, штропы, элеватор, талевой блок, вертлюги и др.); вертикального стержня (3) с равномерно распределенной по длине массой, имитирующую бурильную колонну, и долота (4) (рис.2.2.1).



Рис.2.2.1. Буровая оснастка.

Перемещение центра долота по вертикали описывается периодической положительной функцией, которая в сегменте  $\left[0, \frac{2\pi}{Nw}\right]$ , имеет вид [2]:

$$x_0 = f(t) = \left(r - \frac{\delta}{3}\right) \left[\cos\left(t - \frac{\pi}{wN}\right)w - \cos\frac{\pi}{N}\right] \cos\beta_1$$
(2.2.1)

Динамика системы талевого механизма бурильной колонны и долота может быть описана следующим образом:

1) для крюка:

$$m_{1} \frac{d^{2} u_{1}}{dt^{2}} = EF \frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{x=0} - cu_{1},$$

$$u_{1}(t) = u(x,t)\Big|_{x=0}, c = k \frac{E_{k}F_{k}}{l_{k}};$$
(2.2.2)

2) для колонны бурильных труб:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2h \frac{\partial u}{\partial t}, a^2 = \frac{E}{\rho};$$
(2.2.3)

3) для долота:

$$u(x,t)|_{x=l} = f(t),$$
 (2.2.4)

здесь  $m_1$  - масса поступательно-движущихся элементов талевого механизма; c жесткость канатной системы;  $E_k$  - модуль упругости материала труб;  $F_k$  площадь поперечного сечения каната; k - кратность полиспаста;  $l_k$  расстояние между осями талевого блока и кронблока; F - площадь поперечного сечения труб; h - коэффициент сопротивления промывочной жидкости;  $\rho$  - плотность материала труб; u(x,t) - перемещение колонны бурильных труб;  $u(x,t)|_{x=t}$  - перемещение центра долота. Для колонны бурильных труб граничное условие может быть записано в виде:

$$m_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\Big|_{x=0} + cu\Big|_{x=0} = EF \frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{x=0}$$
(2.2.5)

Таким образом, задача сводится к решению уравнения (2.2.3) при граничных условиях (2.2.4) и (2.2.5)

Применим разложение в ряд Фурье для функций f(t)из выражения (2.2.1) [2]

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \overline{A}_n \cos \frac{nNw}{2} t,$$
 (2.2.6)

где

$$a_0 = 2\left(r - \frac{\delta}{3}\right) \left[\frac{N}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)\right] \cos\beta_1, \qquad (2.2.7)$$

$$\overline{A_n} = -4\left(r - \frac{\delta}{3}\right) \frac{N\left[(-1)^n + 1\right]}{\pi \left(N^2 n^2 - 4\right)} \sin \frac{\pi}{N} \cos \beta_1.$$
(2.2.8)

 $\delta$  - глубина погружения зубьев в породу,  $\beta_1$  - половина угла раствора конуса. Введем обозначение:  $u(x,t) = u_0(x) + v(x,t)$ . Подставляя в (2.2.2), (2.2.3) и (2.2.4) получаются выражения для нахождения v(x,t) и  $u_0(k)$ . Для определения  $u_0(k)$ :

$$a^2 \frac{d^2 u_0(x)}{dx^2} = 0, (2.2.9)$$

$$EF \frac{\partial u_0(x)}{\partial x}\Big|_{x=0} - cu_0(x)\Big|_{x=0} = 0,$$
(2.2.10)

$$u_0(x)|_{x=l} = \frac{a_0}{2}.$$
(2.2.11)

$$\begin{split} \mathbf{H} \ \mathbf{v}(\mathbf{x},t): \\ m_1 \frac{\partial^2 \mathbf{v}(\mathbf{x},t)}{\partial t^2} \Big|_{x=0} &= EF \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{x},t)}{\partial x} \Big|_{x=0} - c \mathbf{v}(\mathbf{x},t) \Big|_{x=0}, \\ \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} &= a^2 \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x^2} - 2h \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}, 0 \langle \mathbf{x} \langle l, t \rangle - \infty, \end{split}$$
(2.2.12)

$$v(x,t)|_{x=l} = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{A_n} \cos \frac{nNwt}{2}, t > -\infty.$$
(2.2.14)

В эти выражения входят следующие величины: *F* - площадь поперечного сечения труб, *E* - модуль упругости материала труб, *c* - жесткость канатной системы, *l* - длина трубы.

Окончательно получается решение задачи (2.2.3) – (2.2.9)

$$u(x,t) = \frac{a_0}{2l\left(\frac{EF}{cl} + 1\right)} \left(x + \frac{EF}{c}\right) + \frac{1}{2l\left(\frac{EF}{cl} + 1\right)} \left(x + \frac{EF}{c}\right) + \frac{1}{2l\left(\frac{EF}{cl} + 1\right)} \left(x + \frac{1}{2l}\right) + \frac{1}{2l\left$$

где  $M_{in}$  - трансцендентные выражения, в которые входят коэффициенты:

$$\alpha_n = \frac{n^2 N^2 w^2}{4a^2}; \beta_n = \frac{hnNw}{a^2}; \gamma_n = \frac{1}{EF} \left(c - m_1 \frac{n^2 w^2 N^2}{4}\right);$$
  
$$b_n = \operatorname{Re}\left(\sqrt{\alpha_n - i\beta_n}\right); \alpha_n = \operatorname{Im}\left(\sqrt{\alpha_n - i\beta_n}\right);$$

если пренебречь сопротивлением среды, т.е. считать, что h = 0, то

$$\beta_{n} = 0, b_{n} = \sqrt{\alpha_{n}} = \frac{nNw}{2a}; \alpha_{n} = 0, \text{ тогда (2.2.15) примет вид:}$$

$$u(x,t) = \frac{a_{0}}{2l\left(\frac{EF}{cl}+1\right)}\left(x + \frac{EF}{c}\right) + \frac{1}{2l\left(\frac{EF}{cl}+1\right)}\left(x + \frac{1}{c}\right) + \frac{1}{2l\left(\frac{EF}{c$$

(2.2.16) - является решением задачи (2.2.3) – (2.2.5) без начальных условий для колонны бурильных труб при бурении шарошечными долотами.

Для изучения вида колебаний провели имитационное моделирование в системе Matlab. Рассмотрим гипотетический вариант объекта со следующими данными:

 $l = 5000 \, \text{м}$  - длина КБТ;  $E = 2 \cdot 10^{11} \, \Pi a$  – модуль упругости материала труб;  $F = 6.15 \cdot 10^{(-4)}$   $M^2$  – площадь поперечного сечения труб; delta=0.3;  $\beta_1 = \frac{\pi}{6}$ ;  $k = 24.5; \rho = 10^3 \kappa^2 / M^2$  - модуль Юнга или плотность материала труб;  $r_0 = 8.5;$  $r = 0.15, m_1 = 1; c = 5.3 \cdot 10^7 H / M$  - жесткость канатной системы; N = 20; n = 20.Сперва рассмотрим решение задачи (2.2.15) при  $h = 10^5$ . Программы моделирования записанны на языке Matlab. %genanov c h %isxodnie dannie l=5000; E=2\*10^11;  $F=6.15*10^{(-4)};$ delta=0.3; beta1=pi/6; ro=10^3; h=10^5; w=6; r0=8.5; r=0.15;

```
m1=1;
%
x=5000;
t=0:1000;
%
s1=0;
N=20;
n=20;
c=5.3*10^7;
a=sqrt(E/ro);
for i=1:n
        A = -4*(r-delta/3)*(N*((-1)^n+1))/(pi*(N^2*n^2-4))*sin(pi/N)*cos(beta1);
       alfa=(n^2*N^2*w^2)/(4*a^2);
       beta=(h^*n^*N^*w)/(a^2);
               bn=sqrt(2*a)/2*sqrt(1+sqrt(1+(beta/alfa)^2));
        gaman=1/(E^*F)^*(c-m1^*(n^2^*w^2^*N^2)/4);
        b=sqrt(2*a)/2*sqrt(1+sqrt(1+(beta/alfa)^2));
        dn=(-beta/(sqrt(2*a)*sqrt(1+sqrt(1+(beta/alfa)^2))));
M1n=bn^*cos(bn^*x)^*cosh(dn^*x)+dn^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*cosh(dn^*x)+dn^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*sin(bn^*x)+gaman^*x)+gaman^*x)+gaman^*x)+gaman^*x)+gaman^*x)+gaman^*x)+gaman^*x)+gaman^*x)+
);
         M2n=-dn^*cos(bn^*x)^*cosh(dn^*x)+bn^*sin(bn^*x)^*sinh(dn^*x)-
gaman*cos(bn*x)*sinh(dn*x);
M3n=bn^*cos(bn^*l)^*cosh(dn^*l)+dn^*sin(bn^*l)^*sinh(dn^*l)+gaman^*sin(bn^*l)^*cosh(dn^*l);
             M4n=bn*sin(bn*l)*sinh(dn*l)-dn*cos(bn*l)*cosh(dn*l)-
gaman*cos(bn*l)*sinh(dn*l);
               N1n=M1n*M3n+M2n*M4n;
                N2n=M1n*M4n-M2n*M3n;
   s1=s1+A^{*}((N1n^{*}cos(n^{*}N^{*}w^{*}t/2)-N2n^{*}sin(n^{*}N^{*}w^{*}t/2))/(M3n^{2}+M4n^{2}));
end
a0=2*(r0-delta/3)*(N/pi*sin(pi/N)-cos(pi/N))*cos(beta1);
u=a0/(2^{*}l^{*}(E^{*}F/(c^{*}l)+1))^{*}(x+E^{*}F/c)+s1;
plot(t,u)
```

Результат моделирования при x=1000 и при x=5000 показаны на рис. 2.2.2.



Рис.2.2.2. Динамика колебания КБТ в процессе бурения шарошечными долотами.

```
Рассмотрим случай, когда h = 0. Решение имеет вид (2.2.16).
```

программа моделирования имеет вид:

```
%genanov c h=0
%isxodnie dannie
l=5000;
E=2*10^11;
F=6.15*10^(-4);
delta=0.3;
beta1=pi/6;
ro=10^3;
h=0;
w=6;
r0=8.5;
r=0.15;
m1=1;
%
x=5000;
t=0:1000;
%
s1=0;
N=20;
n=20;
c=5.3*10^7;
a=sqrt(E/ro);
for i=1:n
  A = -4*(r-delta/3)*(N*((-1)^n+1))/(pi*(N^2*n^2-4))*sin(pi/N)*cos(beta1);
  alfa=(n^2*N^2*w^2)/(4*a^2);
  beta=(h*n*N*w)/(a^2);
  gama=1/(E^*F)^*(c-m1^*(n^2^*W^2^*N^2)/4);
  b=n^*N^*w/(2^*a);
  d=0;
  s1=s1+A^{*}((b^{*}cos(b^{*}x)+gama^{*}sin(b^{*}x))^{*}cos(n^{*}N^{*}w^{*}t/2))/(b^{*}cos(b^{*}l)+gama^{*}sin(b^{*}l));
end
a0=2*(r0-delta/3)*(N/pi*sin(pi/N)-cos(pi/N))*cos(beta1);
u=a0/(2^{l}(E^{F}/(c^{l})+1))^{(x+E^{F}/c)+s1};
```

plot(t,u)

Отсюда видно, что при указанных исходных данных опасным для работы КБТ с точки зрения возникающих напряжений является интервал числа оборотов  $n_{uu} = 3 - 606 / мин$ . Так как применяемая модель является упрощенной, то полученный результат следует рассматривать как качественный.

### 2.3 Исследования крутильных колебаний КБТ методом конечных разностей и методом аналогий.

Одним из наиболее распространенных приближенных методов решения дифференциальных уравнений с частными производными является метод конечных разностей.

Основная идея метода заключается в том, что сплошное тело или среда рассматривается как совокупность большого числа элементарных объемов. Конечно-разностное приближение представляет собой замену системы с распределенными параметрами набором дискретных элементов так, что характеристика исходной системы приближенно остается неизменной.

При конечно-разностной аппроксимации сплошная область изменения аргументов заменяется сеткой, в узлах которой рассматривается поведение искомой функции. При этом все производные (как по пространственной координате, так и по времени) приближенно заменяются разностными соотношениями и выражаются через значения функций в соседних узлах. Таким образом, дифференциальное уравнение в частных производных может быть сведено к системе алгебраических уравнений. Подход такого рода применяется при решении широкого класса задач математической физики на ЭВМ.

При реализации исследуемой задачи в программе Simulink применяется аппроксимация производных по пространственной координате, а производные по времени остаются неизменными. Здесь учитывается тот факт, что независимой переменной является время, т.е. целесообразно сведение уравнения в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Такой подход к решению уравнений математической физики называют методом прямых.



Рис. 2.3.1. Звено дискретной цепочки с учетом действующих сил, являющейся аналогом колонны бурильной трубы.

Применение метода прямых соответствует схеме, при которой, скажем, колонна бурильных труб или длинный трубопровод разбивается на сечения, где сосредоточены массы и силы, распределенные по соответствующему участку. Последние предполагаются соединенными между собой связями, которые в зависимости от уровня воспринимаемых нагрузок могут быть упругими, вязкими, вязкоупругими, упругопластическими и т.п.

На рис.2.3.1 изображено звено дискретной цепочки с учетом действующих сил, являющейся аналогом колонны бурильных труб. В статическом режиме цепочка в точности соответствует колонне. Но с увеличением частоты колебаний появляется расхождение в поведении колонны и ее дискретной модели.

Известно соотношение между скоростью распространения колебаний a, длиной линии, приходящейся на один элемент цепочки  $\Delta x$ , и верхней граничной частотой  $\omega$  моделирования сплошной линии дискретной цепоч-кой:

$$\frac{l}{n} = \Delta x = \frac{a}{\pi \omega}, \qquad (2.3.1)$$

Дело в том, что если сплошная линия обладает бесконечным числом собственных частот, то дискретная цепочка имеет конечное число собственных частот. Таким образом, в зависимости от желаемой точности, т.е. для выявления той или иной частоты, нужно изменять шаг разбиения  $\Delta x$ . Например, для качественной оценки динамических нагрузок бурильной колонны достаточно выявление основной формы колебаний.



Рис 2.3.2. Элемент упругого стержня.

Одним из приемов увеличения точности моделирования при равномерном шаге является увеличение числа сечений и, как следствие, увеличение порядка системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Это влечет за собой увеличение числа интегрирующих элементов, что в принципе возможно, применении современных компьютерных систем, однако модель при этом усложняется.

Получение конечно-разностного приближения дифференциального уравнения с частными производными аналогично физическим исследованиям.

Рассмотрим элемент упругого стержня, изображенный на рис.2.3.2. Если точки (i-1), i и (i+1) смещаются на величины  $u_{i-1}, u_i, u_{i+1}$  соответственно, то градиент смещения может быть выражен как разность смещений, деленная на расстояние между ними. Тогда замена производной может быть осуществлена одним из следующих способов:

$$u'_{i} \approx \frac{u_{i} - u_{i-1}}{\Delta x}, \qquad (2.3.2)$$

левое разностное соотношение,

$$u_1' \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x},\tag{2.3.3}$$

правое разностное соотношение.

Часто применяются центральное разностное отношение, как среднее из правой и левой разностей:

$$u'_{1} \approx \frac{u_{1+1} - u_{i-1}}{2\Delta x},$$
 (2.3.4)

Вторая производная представляется в виде:

$$u''_{i} \approx \frac{u_{i+1} - 2u_{i} + u_{i-1}}{\Delta x^{2}}, \qquad (2.3.5)$$

Выясним величину погрешности, допускаемой при конечноразностной аппроксимации производных.

Ряд Тейлора для функции u(x) в некоторой точке x, записанный через функцию и ее производную в соседней точке  $x_0$ , имеет вид:

$$u(x) = u(x_{0}) + (x - x_{0})\frac{du}{dx}\Big|_{x_{0}} + \frac{(x - x_{0})^{2}}{2!}\frac{d^{2}u}{dx^{2}}\Big|_{x_{0}} + \frac{(x - x_{0})^{3}}{3!}\frac{d^{3}u}{dx^{3}}\Big|_{x_{0}} + \frac{(x - x_{0})^{4}}{4!}\frac{d^{4}u}{dx^{4}}\Big|_{x_{0}} + \dots$$
(2.3.6)

Тогда смещение в точке (i + 1) (см. рис.2.3.2), выраженное через смещение в точке i, при  $x - x_0 = \Delta x$  будет

$$u_{i+1} = u_1 + \Delta x \frac{du}{dx}\Big|_i + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{d^2 u}{dx^2}\Big|_i + \frac{\Delta x^3}{3!} \frac{d^3 u}{dx^3}\Big|_i + \frac{\Delta x^4}{4!} \frac{d^4 u}{dx^4}\Big|_i + \dots,$$
(2.3.7)

а смещение в точке (i - 1)

$$u_{i-1} = u_1 - \Delta x \frac{du}{dx}\Big|_i + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{d^2 u}{dx^2}\Big|_i - \frac{\Delta x^3}{3!} \frac{d^3 u}{dx^3}\Big|_i - \frac{\Delta x^4}{4!} \frac{d^4 u}{dx^4}\Big|_i + \dots,$$
(2.3.8)

Вычитая (8) из (7), получим

$$u_{i+1} - u_{i-1} = 2\Delta x \frac{du}{dx}\Big|_{i} + 2\frac{\Delta x^{3}}{3!} \frac{d^{3}u}{dx^{3}}\Big|_{i} + \dots,$$

$$\frac{du}{dx}\Big|_{i} = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} + \varepsilon, \qquad (2.3.9)$$

где 
$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta x^3}{3!} \frac{d^3 u}{dx^3} \Big|_i - \dots,$$
 (2.3.10)

Таким образом, погрешность формулы для центральной разности, представленной выражением (2.3.4) при малом  $\Delta x$ , имеет порядок  $\Delta x^2$ . Используя разложение в ряд Тейлора, можно показать, что погрешность для аппроксимации левыми (2.3.2) или правыми (2.3.3) разностями будет иметь порядок  $\Delta x$ :

$$\varepsilon = -\frac{\Delta x^2}{2} \frac{d^2 u}{dx^2}\Big|_i - \dots, \qquad (2.3.11)$$

Для оценки погрешности второй производной сложим (2.3.7) и (2.3.8):

$$u_{i+1} + u_{i-1} = 2u_i + \Delta x^2 \frac{d^2 u}{dx^2}\Big|_i + \frac{\Delta x^4}{12} \frac{d^2 u}{dx^4}\Big|_i + \dots$$

Разрешим последнее выражение относительно второй производной:

$$\frac{d^2 u}{dx^2}\Big|_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} + \varepsilon,$$
(2.3.12)

$$\varepsilon = -\frac{\Delta x^2}{12} \frac{d^4 u}{dx^4} \Big|_i - \dots,$$
(2.3.13)

Значит, погрешность аппроксимации второй производной центральной разностью также имеет порядок квадрата шага разбиения. Естественно, что при  $\Delta x \rightarrow 0$  ошибка аппроксимации также стремится к нулю.

Рассмотрим приложение метода прямых для решения одномерного уравнения гиперболического типа на ЭВМ.

#### Уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \qquad (2.3.14)$$

согласно (2.3.12) может быть представлено в виде

$$\frac{d^{2}u}{dx^{2}}\Big|_{i} = \alpha_{1}(u_{i+1} - 2u_{i} + u_{i-1}), \qquad (2.3.15)$$
$$\alpha_{1} = \frac{a^{2}}{\Delta x^{2}}$$

где*i* - номер сечение по оси 0х.

В зависимости от масштабов аргумента, функции и от величины  $\Delta x$  коэффициент  $\alpha_1$  принимает различные значения. Рис.2.3.3 иллюстрирует решение уравнения на ЭВМ, где построена блок-схема набора модели в программе Simulink



Рис.2.3.3

Таким образом, метод конечных разностей позволяет перейти от уравнения в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

#### 2.4. Метод аналогий.

Рассмотрим уравнение длинной двухпроводной линии, которая представлена системой с равномерно распределенными утечками, индуктивностями, сопротивлениями и емкостями. Разность потенциалов U и сил токов I в сечениях x и  $x + \Delta x$  определяется на основании закона Кирхгофа, записанного для процесса, протекающего на отрезке  $\Delta x$  в промежутке времени  $\Delta t$ . Разность $U(x,t) - U(x + \Delta x, t)$  определяет разность потенциалов на индуктивностях и омических сопротивлениях [2]:

$$U(x,t) - U(x + \Delta x, t) = L\Delta x \frac{I(x,t + \Delta t) - I(x,t)}{\Delta t} + RI(x,t)\Delta x,$$

Где L и R - соответственно индуктивность и омическое сопротивление на единицу длины.

Первый член правой части, характеризующий изменения э.д.с. на индуктивностях, определяется изменением силы тока во времени. Второй член – разность потенциалов, которая рассчитывается по закону Ома.

Второе уравнение – баланс силы тока, определяемый конденсатором и утечкой, т.е.

$$I(x,t) - I(x + \Delta x, t) = C\Delta x \frac{U(x,t + \Delta t) - U(x,t)}{\Delta t} + GU(x,t)dx,$$

где C – емкость, приходящаяся на единицу длины, G - утечка на единицу длины.

Первый член правой части – сила тока, проходящего через конденсатор и характеризуемого изменением разности потенциалов во времени. Второй член – утечка, определяемая по закону Ома. Разделив на  $\Delta x$  и  $\Delta t$  и переходя к пределу при  $\Delta x \rightarrow 0$  и  $\Delta t \rightarrow 0$ , получаются следующие уравнения:

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = L\frac{\partial I}{\partial t} + RI,$$
  
$$-\frac{\partial I}{\partial x} = C\frac{\partial U}{\partial t} + GU$$
  
(2.4.1)

Система уравнений (2.4.1) может быть сведена к одному уравнению, для чего первое уравнение дифференцируется по t, а второе по x и сравниваются одинаковые члены  $\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t}$ . Не трудно убедиться, что в случае, когда G = 0, система (2.4.1) сводится к дифференциальному уравнению гиперболического типа:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial t^2} = \frac{1}{LC} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} - \frac{R}{L} \frac{\partial I}{\partial t}$$
(2.4.2),

которое аналогично уравнению

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2h \frac{\partial u}{\partial t},$$
(2.4.3)  
rge  $a^2 = \frac{1}{LC}; 2h = \frac{R}{L}; u = I.$ 

Это уравнение, формально, подобно дифференциальным уравнением движения колонны бурильных труб в среде с сопротивлением, пропорциональным первой степени скорости движения колонны. Одним из распространенных методов решения уравнения (2.4.3) является метод аналогий, дающий возможность решения (2.4.3) на основе существующей аналогии между дифференциальными уравнениями двух различных по своей природе явлений.

Здесь показана возможность перехода от уравнения электрических колебаний к уравнению механических колебаний. Перейдя к безразмерным переменным,

$$\overline{x} = \frac{x}{x_0}, t = \frac{t}{t_0}, \overline{I} = \frac{I}{I_0}, \overline{u} = \frac{u}{u_0}$$

где  $x_0 = l$  - длина колонны, приравнивая коэффициенты при соответствующих производных, получаются соотношения, определяющие переход от электрических величин к механическим. Безразмерная форма дифференциального уравнения позволяет оценить время релаксации и дает возможность упростить дифференциальное уравнение. Время релаксации оценивается по формуле  $t_0 = \frac{l}{a}$ ; вводя обозначения:  $X = \frac{2hl}{a}$ , получается

уравнение движения колонны в безразмерных переменных:

$$\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial \overline{t}^2} = \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial \overline{x}^2} - X \frac{\partial \overline{u}}{\partial t}, \qquad (2.4.4)$$

Если безразмерный параметр X достаточно большой, то можно пренебречь силой инерции по сравнению с силой сопротивления. Такое предположение оправдывается для колонны бурильных труб при достаточно большой длине *l*.

Пренебрежем силами инерции. Пусть нижний конец колонны прихвачен, а в верхнем сечении задано условие, необходимое для ее извлечения. Тогда граничное условие можно записать в виде:

$$EF \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\Big|_{x=0} = B(t); u(x,t)\Big|_{x=t} = 0$$
(2.4.5)

В начале подъема колонна бурильных труб подвешена на крюке и поэтому динамическое перемещение отсчитывается от статического положения равновесия. В этом случае начальные условия принимаются равными к нулю:

$$u(x,t)\big|_{t=0} = 0; \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\big|_{t=0} = 0, \qquad (2.4.6)$$

В безразмерной форме граничные и начальные условия записываются аналогично (2.4.6)

Исследуем возможности пренебрежения силами инерции, т.е. замены уравнения (2.4.4) уравнением:

$$\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial \overline{t}^2} = \frac{1}{X} \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial \overline{x}^2}$$

при нулевых начальных и граничных условиях типа (2.4.5), (2.4.6).

Возможность такого перехода зависит от величин параметра X. Решение этой задачи для наглядности можно получить методом конечных разностей на ЭВМ. Для получения конечно-разностного приближения дифференциального уравнения с частными производными, систему с распределенными параметрами заменяют набором дискретных элементов так, что характеристика исходной системы приближенно остается неизменной. При конечно-разностной аппроксимации сплошная область изменения аргументов заменяется сеткой, в узлах которой рассматривается поведение искомой функции. При этом все производные заменяются разностными соотношениями (2.4.2) и (2.4..3). Таким образом, дифференциальное уравнение в частных производных сводится к системе алгебраических уравнений. Описанный метод широко применяется при решении задач математической физики на ЭВМ.

Блок-схема моделирования показана на рис 2.3.3 В ней реализованы следующие выражения:

$$\frac{\partial^{2} u}{\partial t^{2}} = \frac{\partial^{2} u}{\partial x^{2}} - X \frac{\partial u}{\partial x},$$

$$\frac{d^{2} u}{dt^{2}} = \frac{u_{i+1} - 2u_{i} + u_{i-1}}{\Delta x^{2}} - X \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x}$$

$$\frac{d^{2} u}{dt^{2}} = \frac{1}{\Delta x^{2}} (u_{i+1} - 2u_{i} + u_{i-1}) - \frac{X}{2\Delta x} (u_{i+1} - u_{i-1})$$
(2.4.7)

Исходя из (2.4.7) введем обозначения:

$$a=rac{1}{\Delta x^2}, b=rac{X}{2\Delta x},$$

отсюда

$$a+b=rac{2+lpha\Delta x}{2\Delta x}$$
 и  $a-b=rac{2-X\Delta x}{2\Delta x}$ 

Получаем

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = (a+b)u_0 - 2au_1 + (a-b)u_2,$$
  

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = (a+b)u_1 - 2au_2 + (a-b)u_3$$
  

$$\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = (a+b)u_2 - 2au_3 + (a-b)u_4$$
  

$$\frac{\partial^2 u_4}{\partial t^2} = (a+b)u_3 - 2au_4 + (a-b)u_5$$
  
(2.4.8)

Моделирование было осуществлено для следующих данных:

$$B(t) = 1; \Delta x = 0.2; x = 0$$

Коэффициент *X* принимаем равным: 0.4, 2 и 2,8. Для реализации исследуемой задачи мы применили компьютерную систему Matlab. Результаты моделирования показаны на рис.2.4.1



Рис. 2.4.1.

График изменения u(x,t) для  $\chi = 0.4$  разных сечений колонны, начиная x = 0 с шагом  $\bar{x} = 0.2$ .

Заметим также как происходит затухание колебаний из-за трения между колонной бурильных труб и глинистым раствором.

### 2.5 Исследования крутильных колебаний КБТ при скачкообразном возрастании момента сопротивления на долоте.

Колонна бурильных труб вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega_0$  и при увеличении осевой нагрузки на забой происходит скачкообразное возрастание момента на долоте на величину  $\Delta M$ . Колонна рассматривается как вертикальный вал с распределенной по длине массой. Начало координат помещено на устье скважины, ось Ox направлена вниз. Обозначая момент инерции колонны на единицу через I, момент трения на единицу длины колонны через  $B\omega$ , элементарную длину колонны через  $\Delta x$  и крутящие моменты в сечениях x и  $x + \Delta x$  соответственно через M(x) и  $M(x + \Delta x)$ , можно записать уравнение

$$I\frac{\partial\omega}{\partial t}\Delta x = M(x) - M(x + \Delta x) - B\omega\Delta x$$
(2.5.1)

По закону Гука между крутящим моментом M и углом закручивания вала  $\theta$  существует следующая зависимость:

$$M = -J_0 G \frac{\partial \theta}{\partial x}, \qquad (2.5.2)$$

где *G* - модуль сдвига; *J*<sub>0</sub> - полярный момент инерции поперечного сечения труб.

Разложив  $M(x + \Delta x)$  в ряд Тейлора в окрестности точки x и ограничиваясь первыми двумя членам, из (2.5.1) можно получить выражение  $\frac{\partial M}{\partial x}$ . Тогда с учетом последнего уравнение (2.5.1) приводится к виду

$$J\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = J_0 G \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - B \frac{\partial}{\partial t} \theta, \qquad (2.5.3)$$

Граничные условия для (3)

$$\frac{\partial}{\partial t} \Big|_{x=0} = \omega_0 = const,$$

$$GJ_0 \frac{\partial}{\partial x} \Big|_{x=l} = -\Delta M = const$$
(2.5.4) II (2.5.5)

Начальный угол закручивания колонны определяется из решения уравнения

$$J_0 G \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - B \omega_0 = 0, \qquad (2.5.6)$$

Уравнение (2.5.6) можно получить из уравнения (2.5.3), принимая в нем  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega_0 = const$  в малом промежутке времени, близком к начальному

моменту.

Решив уравнение (2.5.6), получается

$$\theta = \frac{B\omega_0 x^2}{2J_0 G} + C_1 x + C_2$$

Принимается, что в сечении x = l крутящий момент равен нулю:

$$\frac{d\theta}{dx}\Big|_{x=l}=0\,,$$

Сечение x = 0 принимается защемленным:

$$\theta|_{x=0}=0$$
,

При выполнении этих условий определяются  $\,C_1\,$ и $\,C_2$ , после чего получается

$$\theta(x,t)\Big|_{t=0} = -\frac{B\omega_0}{2J_0G}(2lx - x^2), \qquad (2.5.7)$$

Как было отмечено выше, второе начальное условие будет

$$\frac{d\theta}{dx}\Big|_{t=0} = \omega_0, \qquad (2.5.8)$$

Для упрощения дальнейшей записи  $\theta$  представляется в виде суммы двух функций:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2, \qquad (2.5.9)$$

где  $\theta_2$  подбирается так, чтобы условия (2.5.4), (2.5.7) и (2.5.8) для функции  $\theta_1$ получились нулевыми. Этому условию отвечает функция

$$\theta_2 = \omega_0 t - \frac{\omega_0 B(2lx - x^2)}{2J_0 G}.$$
(2.5.10)

Подставляя значение  $\theta_2$  из формулы (2.5.10) в выражение (2.5.9), а значение  $\theta$ из (2.5.9) в уравнения (2.5.3), (2.5.4) и (2.5.5), для  $\theta_1$  получается

$$I\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = J_0 G\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - B\frac{\partial}{\partial t}\theta, \qquad (2.5.11)$$

С граничными условиями

$$\frac{\partial}{\partial t} \Big|_{x=0} = 0,$$

$$GJ_0 \frac{\partial \theta_1}{\partial x}\Big|_{x=l} = -\Delta M$$
(2.5.12)  $\varkappa$  (2.5.13)

и с нулевыми начальными условиями.

Решение задачи (2.5.11) – (2.5.13) с нулевыми начальными условиями в изображениях имеет вид

$$\overline{\theta}_{1} = -\frac{\Delta Mash\frac{1}{a}\sqrt{p^{2}+2phx}}{J_{0}G\sqrt{p^{2}+2ph}ch\frac{1}{a}\sqrt{p^{2}+2phi}},$$

$$a = \sqrt{\frac{J_{0}G}{I}}, 2h = \frac{B}{I}$$
(2.5.14)

Переходя от (2.5.9) и (2.5.10) к изображениям, с учетом (2.5.14) для изображения *θ* получается следующее изображение:

$$\overline{\theta} = \frac{\omega_0}{p} - \frac{\Delta Mash \frac{1}{a} \sqrt{p^2 + 2phx}}{J_0 G \sqrt{p^2 + 2phch} \frac{1}{a} \sqrt{p^2 + 2phi}} - \frac{\omega_0 B(2lx - x^2)}{2J_0 G}, \qquad (2.5.15)$$

Изображения  $\omega$  и M определяются соответственно выражениями

$$\overline{\omega} = p\overline{\theta} - p\theta(0), \qquad (2.5.16)$$

$$\overline{M} = -J_0 G \frac{d\overline{\theta}}{dx}, \qquad (2.5.17)$$

Подставляя значение  $\overline{\theta}$  из уравнения (2.5.15) в уравнения (2.5.16) и (2.5.17), получается

$$\overline{\omega - \omega_0} = -\frac{\Delta Mash \frac{1}{a}\sqrt{p^2 + 2ph}x}{J_0 G\sqrt{p^2 + 2ph}ch \frac{1}{a}\sqrt{p^2 + 2ph}i},$$
(2.5.18)

$$\overline{M} - M_{0} = \frac{\Delta Mach \frac{1}{a} \sqrt{p^{2} + 2phx}}{ch \frac{1}{a} \sqrt{p^{2} + 2phi}}, M_{0} = M(x,t)|_{t=0}, \qquad (2.5.19)$$

Обозначив  $\sqrt{p^2 + 2hp} = \alpha, \frac{x}{a} = \tau, \frac{l}{a} = \tau_0$ , выражения (2.5.18) и (2.5.19) можно

записать в виде

$$\overline{\omega - \omega_0} = -\frac{\Delta Maps\,\alpha\tau}{J_0 G\alpha ch\alpha\tau};\tag{2.5.20}$$

$$\overline{M - M_0} = \frac{\Delta M ch\alpha\tau}{ch\alpha\tau},$$
(2.5.21)

Выражения (2.5.20) и (2.5.21) преобразуется к виду

$$\overline{\omega - \omega_0} = -\frac{\Delta Map}{J_0 G \sqrt{p^2 + 2ph}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left\{ e^{-\alpha [(2n+1)\tau_0 - \tau]} - e^{-\alpha [(2n+1)\tau_0 + \tau]} \right\},$$
(2.5.22)

$$\overline{M - M_0} = -\Delta M \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left\{ e^{-\alpha [(2n+1)\tau_0 - \tau]} - e^{-\alpha [(2n+1)\tau_0 + \tau]} \right\},$$
(2.5.23)

Известно, что

$$e^{-(\tau_{0}-\tau)\sqrt{p^{2}+2hp}} \rightarrow \left[ e^{-h(\tau_{0}-\tau)} + h(\tau_{0}-\tau) \int_{\tau_{0}-\tau}^{t} \frac{I_{1}(h\sqrt{\delta^{2}-(\tau_{0}-\tau)^{2}})}{\sqrt{\delta^{2}-(\tau_{0}-\tau)^{2}}} d\delta \right] e_{0}[t-(\tau_{0}-\tau)],$$
(2.5.24)

где ${\it I}_1$ - модифицированная функция Бесселя первого рода.

Подставляя выражение (2.5.24) в (2.5.23), получаем

$$(-1)^{n} \left\{ e^{-h[(2n-1)\tau_{0}-\tau]} - h[(2n-1)\tau_{0}-\tau] \times \int_{(2n-1)\tau_{0}+\tau} e^{-h\delta} \frac{I_{1}(h\sqrt{\delta^{2}-[(2n-1)\tau_{0}-\tau]^{2}})}{\sqrt{\delta^{2}-[(2n-1)\tau_{0}-\tau]^{2}}} d\delta \right\} \times \frac{M-M_{0}}{M-M_{0}} = -\Delta M \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2} \left[ e^{-h[(2n-1)\tau_{0}-\tau]} - h[(2n-1)\tau_{0}+\tau] \times \int_{(2n-1)\tau_{0}+\tau} e^{-h\delta} \frac{I_{1}(h\sqrt{\delta^{2}-[(2n-1)\tau_{0}+\tau]^{2}})}{\sqrt{\delta^{2}-[(2n-1)\tau_{0}+\tau]^{2}}} d\delta \right\}$$

(2.5.24)

При  $t = \tau_0 - \tau$ 

$$M - M_0 = \Delta M e^{-\alpha(\tau_0 - \tau)} = \Delta M e^{-\alpha t}, \qquad (2.5.25)$$

Аналогично, переходя от изображения  $\omega - \omega_0$  из (2.5.22) к оригиналу при  $t = \tau_0 - \tau$ , получается

$$\omega - \omega_0 = -\frac{\Delta M}{J_0 G} e^{-ht} \,. \tag{2.5.26}$$

Из выражений (2.5.25) и (2.5.26) видно, что фронт волны момента, а также угловой скорости затухает с увеличением, т.е. по мере продвижения волны от забоя к устью скважины.

При вращении трубы в резервуаре, заполненном глинистым раствором вязкостью по СПВ-5 102с, для 102 мм труб получено значение *h*, равное 0,03с.

## 2.6. Определение напряжений при крутильных колебаниях колонны бурильных труб.

Для исследования динамики вращательного движения колонны труб принимается схема:



Рис. 2.6.1.

где 1- вращающиеся элементы ротора с приведенным моментом инерции  $I_1$ , на которые действует приведенный момент вращения  $M_1$ ; 2 — колонна бурильных труб с моментом инерции на единицу длины l; полярным моментом инерции поперечного сечения трубы  $J_0$ , модулем сдвига материала труб G; 3-утяжеленный низ с моментом инерции  $I_2$ , на который со стороны пород действует момент сопротивления  $M_2$ .

Дифференциальные уравнения движения элементов системы имеют вид [1]:

для верха:

$$I_{1}\frac{d^{2}\varphi_{1}}{dt^{2}} = M_{1} + J_{0}G\frac{d\varphi}{dx}\Big|_{x=0} - H_{1}\frac{d\varphi_{1}}{dt}$$
(2.6.1)

для колонны бурильных труб:

$$\frac{d^{2}\varphi}{dt^{2}} = a^{2-} \frac{d^{2}\varphi}{dx^{2}} - 2h \frac{d\varphi}{dt}$$
(2.6.2)

для утяжеленного низа:

$$I_{2}\frac{d^{2}\varphi_{2}}{dt^{2}} = -M_{2} - J_{0}G\frac{d\varphi}{dx}\Big|_{x=l} - H_{2}\frac{d\varphi_{2}}{dt}$$
(2.6.3),

где  $\varphi_1(t) = \varphi(x,t)|_{x=0}; \ \varphi_2(t) = \varphi(x,t)|_{x=l}; \ a^2 = \frac{GJ_0}{I}; 2h = \frac{H}{l}$ 

*H*<sub>1</sub>,*H*<sub>2</sub>,*H* - коэффициенты приведенного момента силы вязкого сопротивления среды, приложенного соответственно к ротору, единице длины колонны и утяжеленному низу. Начальные условия принимаются нулевыми.

После определенных преобразований получается выражение для крутильных колебаний:

$$P(x,t) = \frac{M_{1,2}a^2}{l^2} \left[ \frac{1}{h^2(1+\alpha)} - \frac{(ht+1)e^{-ht}}{h^2(1+\alpha)} - 2e^{-ht} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha l \cos\gamma_n \left(1 - \frac{x}{l}\right) \left(h \sin\frac{\gamma_n at}{l} + \frac{\gamma_n a}{l} \cos\frac{\gamma_n at}{l}\right)}{a\gamma_n \left(\alpha + \alpha^2 + \gamma_n^2\right) \left[h^2 + \left(\frac{\gamma_n a}{l}\right)^2\right] \cos\gamma_n} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha \cos\gamma_n \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\left(\alpha + \alpha^2 + \gamma_n^2\right) \left[h^2 + \left(\frac{\gamma_n a}{l}\right)^2\right] \cos\gamma_n} \right]$$

(2.6.4)

Напряжения в бурильной колонне определяется из выражения ; представляющего закон Гука:

$$\tau = GR \frac{\partial \varphi}{\partial x} \tag{2.6.5}$$

Окончательно получается выражение для напряжения в бурильной колонне:
$$\tau(x,t) = -2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{GRM_{1,2}a^{2}\alpha\gamma_{n}\sin\gamma_{n}\left(1-\frac{x}{l}\right)}{l^{2}\left(\alpha+\alpha^{2}+\gamma_{n}^{2}\right)\left[h^{2}+\left(\frac{\gamma_{n}a}{l}\right)^{2}\right]\cos\gamma_{n}} - (2.6.6)$$
$$-2e^{-ht}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{GRM_{1,2}a\ \alpha\gamma_{n}\sin\gamma_{n}\left(1-\frac{x}{l}\right)\left(h\sin\frac{\gamma_{n}at}{l}+\frac{\gamma_{n}a}{l}\cos\frac{\gamma_{n}at}{l}\right)}{l^{2}\left(\alpha+\alpha^{2}+\gamma_{n}^{2}\right)\left[h^{2}+\left(\frac{\gamma_{n}a}{l}\right)^{2}\right]\cos\gamma}$$

В выражения (2.6.5) и (2.6.6) входят величины:

$$M_{1,2} \frac{M_1 l^2}{I_1 a^2}; \ \alpha = \frac{Il}{I_1}; \ \gamma_n = \frac{(2n-1)\pi}{2}$$

Для моделирования динамики вращательного движения бурильной колонны применим компьютерную систему Matlab.

•

Сформируем, сперва, задачу исследования и приведем численные значения необходимых параметров.

Рассмотрим гипотетический вариант, когда длина колонны равна  $l = 5*10^3$  м, а длина утяжеленного низа  $l_2 = 50$  м, внешний радиус колонны  $R_{11} = 5.7*10^{-2}$  м, а внутренний  $R_{12} = 4.7*10^{-2}$  м, внешний радиус УБТ  $R_{21} = 7.3*10^{-2}$  м, а внутренний  $R_{22} = 3.7*10^{-2}$  м;  $q_1, q_2$  — соответственно колонны и УБТ:  $q_1 = 256 \frac{H}{m}$ ;  $q_2 = 980 \frac{H}{m}$ ; f — коэффициент трения f = 0.4, G-модуль сдвига материала труб  $G = 8*10^{10} \frac{H}{m^2}$ .

Рассчитаем следующие величины по соответствующим формулам: *I*-момент инерции колонны на единицу длины:

$$I = \frac{q_1 \left( R_{11}^2 + R_{12}^2 \right)}{2g}$$

*I*<sub>1</sub> - приведенный момент инерции:

$$I_1 = Il_1$$

 $I_{\rm 2}\,$  -момент инерции утяжеленных бурильных труб:

$$I_2 = \frac{q_2 \left( R_{21}^2 + R_{22}^2 \right)}{2g} l_2$$

 ${\cal I}_{\scriptscriptstyle 0}$  - полярный момент инерции поперечного сечения труб:

$$I_0 = \frac{1}{2}\pi (R_{11}^2 - R_{12}^2)(R_{11}^2 + R_{12}^2)$$

При вращении трубы в резервуаре, заполненном глинистым раствором вязкостью по СПВ-5 102 с, для труб 102 мм, получено значение *h* =0.03с. Записали программу на языке системы Matlab [2]. Провели модельные эксперименты. Полученные результаты представлены на рис. 2.6.2

*I*<sub>1</sub>=356; *l* =5000;  $J_0 = 891*10^8$ *G* =8\*10^10; *I*<sub>2</sub>=16.7;  $I = 712*10^{(-4)};$ *M*<sub>1</sub>=150; *M*<sub>2</sub>=320; akv=G\*Jo/I;  $\alpha = I^* l / I_1;$ *h* =0.03;  $M_{12} = M_1 * l^2 / (I_1 * akv);$ *R* =10; % *n* =5; for i=1:*n* niu(i)=(2\*i-1)\*pi/2; end x=2000; t=[0:0.9:100];

```
a=sqrt(akv);
A1=(G*R*M12*a*alfa*(1-x/l))/(l^2);
s1=0;
s2=0;
for i=1:N
s1=s1+(A1*a*niu(i)*sin(niu(i)))/(l*(alfa+alfa^2+niu(i)^2)*...
(h^2+(niu(i)*a/l)^2)*cos(niu(i)));
s2=s2+A1*sin(niu(i))*(h*sin(niu(i)*a*t)/l)+niu(i)*a/l*cos(niu(i)*a*t/l)/...
((alfa+alfa^2+niu(i)^2)*(h^2+(niu(i)*a/l)^2)*cos(niu(i)));
end
tau=-2*s1-2*exp(-h*t).*s2;
plot(t,tau)
```

x=4000;

t=[0:0.9:100];



```
x=5000;
```

t=[0:0.9:100];



x=6000;

t=[0:0.9:100];





t=[0:0.9:100];





Зависимости  $\varphi(x,t)$  при различных x (графики напряжений крутильных колебаний КБТ в разных сечения колонны).

R=100;



Рис. 2.6.3.

С практической точки зрения представляет интерес выражение соответствующее напряженному состоянию колонны труб для достаточно большого времени после окончания переходного режима. Воспользовавшись теоремой об определенных значениях, получено [1] выражение, описывающее напряженное состояние колонны бурильных труб при большой продолжительности вращения ротора после переходного режима и когда

$$M_1 = const$$
,  $M_2 = 0$ ,  $I_2 = 0$ :  $\tau(x, \infty) = \frac{M_1 R \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{J_0(1 + \beta)}$ ;  $\beta = \frac{I_1}{I_0}$ ;  $I_0 = Il$ 

Из полученных выражений можно сделать ряд естественных выводов. Например, с увеличением момента инерции вращающихся масс на устье увеличивается  $\beta$ , что приводит к уменьшению  $\tau$ . С увеличением же момента инерции колонны бурильных труб, т.е. с уменьшением  $\beta$ , напряжение, естественно, возрастает. Заметим также как происходит затухание колебаний из-за трения между колонной бурильных труб и глинистым раствором.

# Глава 2.7. Разработка и принцип построения модели КБТ

Ряд производственных механизмов характеризуется наличием весьма протяженных валов, трансмиссий, канатов и других устройств, через которые передаются усилия рабочим органам. При анализе динамических режимов электропривода представление таких устройств В виде систем C существенно сосредоточенными параметрами может исказить действительную картину физических процессов. В настоящей работе рассматривается один из методов анализа переходных процессов в электроприводе роторного стола буровой установки. Роторный стол приводит во вращение колонну бурильных труб, через которую передается вращающий момент рабочему органу – долоту, осуществляющему разбуривание породы. В современных буровых установках длина колонны может достигать нескольких километров. Очевидно, что при указанных условиях совершенно недопустимо игнорировать процесс распространения моментов и скоростей вдоль колонны.

Для существующих бурильных труб скорость распространения крутильных колебаний вдоль колонны составляет 3300м/с, т.е. время распространения возмущения вдоль колонны может превышать 1-2 с. Анализ динамики рассматриваемой системы можно выполнить, представляя колонну бурильных труб в виде упругого однородного стержня с постоянными значениями моментов инерции и сопротивления в любом сечении. Кроме того, при вращении колонны в скважине имеет место только вязкое трение первого рода. Тогда элемент колонны единичной длины может быть охарактеризован соответствующими значениями момента инерции  $J_0$ , коэффициента вязкого трения  $h_0$  и податливости  $e_0$  (или жесткости  $c_0$ ).



Рис 2.7.1. Принципиальная схема для расчета КБТ

Для элемента бурильной колонны длиной  $\Delta x$ , (рис2.7.1) при пренебрежении ее деформацией за время  $\Delta t$ , можно записать [1]

$$M_{2} - M_{1} = \Delta M = J_{0} \Delta x \frac{\Delta w}{\Delta t} + h_{0} \Delta x w,$$

откуда

$$\frac{\partial M}{\partial x} = J_0 \frac{\partial w}{\partial t} + h_0 w \tag{2.7.1}$$

С учетом деформации элемента  $\Delta x$ , за время  $\Delta t$ , справедливо:

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{e_0} \frac{\Delta M}{\Delta t}$$

или

$$\frac{\partial w}{\partial x} = c_0 \frac{\partial M}{\partial t}$$
(2.7.2)

Получение уравнения (2.7.1) и (2.7.2) аналогичны дифференциальным уравнениям длинной электрической линии без утечки. В соответствие с первой системой электромеханических аналогий, когда аналогиами механических величин момента M, скорости w, податливости  $e_0$ , коэффициента трения  $h_0$  и момента инерции  $J_0$  являются в электрической

системе соответственно напряжения u, ток i, емкость  $C_0$ , сопротивление  $R_0$  и индуктивность  $L_0$  могут быть записаны уравнения

$$\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 i \tag{2.7.3}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \tag{2.7.4}$$

Система уравнений (2.7.1) и (2.7.2), как и система уравнений второго порядка, получившего название телеграфного, может быть представлена так:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t} + \frac{h_0}{J_0} \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{J_0 e_0} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$
(2.7.5);

или в электрических величинах

$$\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + \frac{R_0}{L_0} \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{J_0 c_0} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$
(2.7.6)

Приведенные уравнения могут быть решены одним из известных методов, полагая, что граничные условия являются либо постоянными, либо – аналитическими функциями только независимой переменной *t*. Решение задачи значительно усложняется в случае, когда граничные условия представляют собой нелинейную функцию параметров системы. Именно последний вариант характерен для рассматриваемой здесь задачи, так как современным системам электропривода обычно присущи нелинейные зависимости между моментом и скоростью.

Приведенный анализ переходных процессов электропривода роторного стола буровой установки, с использованием математической модели, получена на основании принципа электромеханического аналога [1].

Модель КБТ описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\overline{w_{1}}}{d\tau} = \alpha_{1} (\overline{M}_{\partial \sigma} - \overline{M}_{1}) - \beta_{1} \overline{\omega_{1}};$$

$$\frac{d\overline{M}_{1}}{d\tau} = \gamma_{1} (\overline{\omega_{1}} - \overline{\omega_{2}});$$

$$\frac{d\overline{M}_{i}}{d\tau} = \gamma_{i} (\overline{\omega_{i}} - \overline{\omega_{i+1}});$$

$$\frac{d\overline{\omega_{i+1}}}{d\tau} = \alpha_{1} (\overline{M}i - \overline{M}_{i+1}) - \beta_{i} \overline{\omega_{i+1}};$$

$$\frac{d\overline{M}_{n}}{d\tau} = \gamma_{n} (\overline{\omega_{n}} - \overline{\omega_{A}});$$

$$\frac{d\overline{M}_{n}}{d\tau} = \alpha_{n} (\overline{M}_{n} - \overline{M}_{A}) - \beta_{n} \overline{\omega_{A}}$$
(2.7.7)

Здесь *n* - число участков, на которые разбиваются КБТ при моделировании.

Для решения системы уравнений (2.7.7) применены два способа. Один заключается в применении визуального програмирования с использованием приложения Simulink, системы Matlab. Составляется блочная модель буровой колонны (рис.2.7.2.), позволяющая менять число *n*. Параметры блоков, входящих в систему (2.7.7), а именно,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  и  $\gamma_i$ , рассчитываются по формулам:

$$\alpha_{0} = \frac{m_{\omega}}{\left(J_{\partial e} + J_{0}\frac{l}{2n}\right)m_{M}m_{t}}; \beta_{0} = \frac{h_{0}l}{(2nJ_{\partial e} + J_{0l})m_{t}};$$
$$\gamma = \frac{nm_{M}}{e_{0}l \cdot m_{w} \cdot m_{t}}; \alpha_{1} = \frac{nm_{w}}{J_{0}lm_{w}m_{t}}; \beta_{1} = \frac{h_{0}}{J_{0}m_{t}};$$
$$\alpha_{n} = \frac{m_{w}}{\left(J_{\partial on} + J_{0}\frac{l}{2n}\right)m_{w}m_{t}}; \beta_{n} = \frac{h_{0}l}{(2nJ_{\partial on} + J_{0}l)m_{w}m_{t}},$$

*m*<sub>w</sub>,*m*<sub>M</sub>,*m*<sub>t</sub> - масштабы соответственно по скорости, моменту и времени. Значения масштабов переменных приняты следующими:

$$m_w = 4B c/pa\partial; m_M = 2.5 \cdot 10^{-3} B/H_M; m_t = 10 B/c$$



Рис. 2.7.2. Блок-схема модели буровой колонны при  $M_{\scriptscriptstyle don} = 426,9$  и n =4.

Структура модели дает возможность наблюдать решение системы (2.7.7) на осциллоскопе, причем можно наблюдать как кончные величины:  $\omega_{\partial}$  и  $M_n$ , так и промежуточные  $\omega_i$  (i = 1, ..., n - 1). Были проведены эксперименты для разных значений  $M_{\partial e}$ ,  $M_{\partial}$  и n.

 $M_{_{\partial 8}}$ ,  $M_{_{\partial}}$ рассчитываются для следующих значений параметров

Наимонование нарамотра	Величина и
Паименование параметра	размерность
Номинальная мощность, Р <sub>н</sub>	250 кВт
Номинальное питающее напряжение, U <sub>н</sub>	<b>380</b> B
Частота вращения ротора, пном	750об/мин
Номинальный ток статора, I1н	<b>8</b> 12 A
Момент инерции двигателя, J	18,26 кг∙м²

Значения параметров, внесенные в таблицу, вводятся в систему Matlab, рассчитываются другие, среди них  $M_{\partial e}$  и  $M_{\partial o n}$ 

pn=250;

un=330;

>> in=**8**12;

>> nnom=750;

>> jd=18.26;

>> rdv=un/in;

```
>> kpdnom=pn/(un*in);
```

```
>> ria=0.5*rdv*(1-kpdnom);
```

>> wn=2\*pi\*nnom/60;ce=(un-in\*ria)/wn;

 $>> Mdv=ce^{*in}$ 

Mdv = 1.7075e + 003 >> k = [0.25, 0.5, 0.75, 1];

 $Mdv=ce^{in^{*}k}$ 

```
Mdol =1.0e+003 * (0.4269 0.8537 1.2806 1.7075)
```

Полученные значения вносятся в структуру моделирования (рис.2.7.2) и проводятся эксперименты для разных значений  $M_{doa}$  и *п*.Результаты приведены на рис. 2.7.3.



Рис.2.7.3. Зависимость  $\omega_i$  от t при n = 5 и  $M_{don} = 426,9$ 



а) n = 5и  $M_{\partial on} = 426,9$ 



б) при *n* =5 *M*<sub>дол</sub> = 853,7



B)  $n = 5 M_{\partial o \pi} = 1280,6$ 



г) при n = 4  $M_{\partial on} = 1707,5$ 





Рис. 2.7.5. Блок-схема модели буровой колонны при  $M_{\scriptscriptstyle don} = 426,9$  и n =7.



Рис. 2.7.6. Зависимость  $\omega_i$  от *t* при *n* =7  $M_{\partial o n} = 426,9$ 

Второй способ состоит в аналитическом решении системы (2.7.7) в системе Matlab. Была составлена программа для n=14, в которую входят два файла: script-file, file-function.

```
function F=gena4(t,x)
```

```
beta=[0.006,0.037,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,
```

```
gama=[0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,
```

```
Mdv=1707.5;
```

Mdol=426.9;

```
F = [alfa(1)^*(Mdv-x(2))-beta(1)^*x(1)
```

```
gama(1)^{*}(x(1)-x(3))
```

```
alfa(2)*(x(2)-x(4))-beta(2)*x(3)
```

```
gama(2)^{*}(x(3)-x(5))
```

```
alfa(3)^{*}(x(4)-x(6))-beta(3)^{*}x(5)
```

 $gama(3)^*(x(5)\text{-}x(7))$ 

```
alfa(4)^{*}(x(6)-x(8))-beta(4)^{*}x(7)
```

```
gama(4)^{*}(x(7)-x(9))
```

```
alfa(5)*(x(8)-x(10))-beta(5)*x(9)
```

```
gama(5)*(x(9)-x(11))
```

```
alfa(6)*(x(10)-x(12))-beta(6)*x(11)
```

```
gama(6)*(x(11)-x(13))
```

```
alfa(7)^{*}(x(12)-x(14))-beta(7)^{*}x(13)
```

```
gama(7)*(x(13)-x(15))
```

```
alfa(8)^{*}(x(14)-x(16))-beta(8)^{*}x(15)
```

```
gama(8)^*(x(15)-x(17))
```

```
alfa(9)*(x(16)-x(18))-beta(9)*x(17)
```

gama(9)\*(x(17)-x(19))

 $alfa(10)^{*}(x(18)-x(20))-beta(10)^{*}x(19)$ 

gama(10)\*(x(19)-x(21))

 $alfa(11)^{*}(x(20)-x(22))-beta(11)^{*}x(21)$ 

```
gama(11)^{*}(x(21)-x(23))
alfa(12)^{*}(x(22)-x(24))-beta(12)^{*}x(23)
gama(12)^{*}(x(23)-x(25))
alfa(13)^{*}(x(24)-x(26))-beta(13)^{*}x(25)
gama(13)^{*}(x(25)-x(27))
alfa(14)^{*}(x(26)-Mdol)-beta(14)^{*}x(27)];
end
```

# %

```
beta=[0.006,0.037,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,0.161,
 1,0.161];
 gama=[0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,
99];
 Mdv=1707.5;
 Mdol=426.9;
 t=0:200;
 y0=zeros(27,1);
[T,X]=ode45(@gena4,t,y0);
%
k=length(X);
m=27;
for j=1:m
 for i=1:k
                  if X(i,m) \ge 0
                                    X(i,m)=X(i,m);
             else
                                                  X(i,m)=0;
                         end
```

```
end
end
%
hold on
plot(T,X(:,1),'-b',T,X(:,27),'-m')
grid on
legend('1','14')
```





а) при *n* =13;



б) при *n* =11;



в) при *n* =15.

# Глава З.

# Исследование условий работы электропривода роторного стола буровых установок.

Нефтегазовая промышленность, а особенно электробурение, являются весьма энергоемкими отраслями, причем основной объем электроэнергии потребляют привод буровых насосов и лебедок. Значительный рост стоимости электроэнергии, получаемой от источников централизованного электроснабжения, и стоимости линий электропередачи, а также наметившиеся тенденции перехода к автономному энергоснабжению с источниками ограниченной установленной мощности выводят на первый план задачи энергосбережения.

При бурении в нефтяной и газовой промышленности эти задачи успешно решаются применением регулируемого электропривода.

Практическая безальтернативность регулируемого электропривода для тяжелых и экстремальных условий эксплуатации обусловливает особую важность создания таких электроприводов для технических средств освоения континентального шельфа.

Основные направления развития электропривода технологических установок нефтяной и газовой промышленности совпадают с общей тенденцией развития электропривода на современном этапе - все более широким применением регулируемого электропривода и компьютерных средств автоматизации при создании нового и модернизации действующего технологического оборудования. Следует также отметить специфическое для нефтяной И газовой промышленности направление дальнейшего совершенствования электропривода повышение надежности И взрывозащищенности.

Современные машины и механизмы в различных областях техники должны отличаться большой производительностью при необходимой точности обработки, высоким уровнем автоматизации, облегчающим обслуживание, а также иметь сравнительно невысокую первоначальную стоимость и небольшие эксплуатационные расходы, быть надежными и долговечными.

Выполнению этих требований способствует автоматизированный электропривод, с помощью которого можно осуществить плавное и широкое регулирование скорости исполнительного механизма, т. е. обеспечить оптимальные технологические режимы. В то же время использование широкорегулируемого электропривода позволяет приблизить электродвигатель к рабочему органу механизма, следовательно, упростить кинематические связи, т. е. осуществить механизмы в целом более точными. При использовании электропривода и соответствующей системы управления легко автоматизируется технологический процесс, а бесперебойная работа электропривода повышает надежность эксплуатируемых машин и механизмов. Поэтому исследование и создание эффективных управляемых электроприводов является важной задачей теории и практики современного автоматизированного электропривода.

Исследователи инженеры, работающие области И В автоматизированного электропривода, в последние годы все больший интерес проявляют к вопросам частотного управления асинхронными двигателями. Этот интерес усиливается тем, что уже в настоящее время не возникает сомнений в возможности и целесообразности создания и серийного изготовления статических преобразователей частоты на тиристорах, отличающихся высокими энергетическими показателями, повышенной надежностью, большим быстродействием, бесшумностью и обеспечивающих на своем выходе требуемое соотношение между частотой и амплитудой напряжения как в статических, так и в динамических режимах.

Соблюдение необходимого и автоматически устанавливаемого соотношения между частотой и амплитудой подводимого напряжения к статору асинхронного двигателя обеспечивается в замкнутых системах частотного управления. Только в таких, автоматически действующих, системах возможно оптимальное управление асинхронными двигателями, причем электрический привод переменного тока, будучи бесконтактным, может обладать лучшими характеристиками по сравнению с автоматически управляемым приводом постоянного тока.

Асинхронный двигатель в этом случае в переходном режиме может развивать существенно большие моменты, чем двигатель постоянного тока, что обеспечивает электроприводу высокое быстродействие с относительно малыми потерями энергии, а в установившемся режиме — плавное, широкое и экономичное регулирование скорости.

### 3.1.Выбор элементов силовой части электропривода.

#### 3.1.1 Выбор двигателя.

Процесс сооружения скважин вращательным способом состоит из повторяющих операций: спуска бурильных труб с долотом (инструмента) в скважину; разрушения породы на забое – собственно бурения; наращивания колонны труб по мере углубления скважины; подъема труб для замены изношенного долота. Для выполнения этих операций, а также работ по креплению ствола скважины используют буровые установки, представляющие собой сложный комплекс производственных механизмов. В состав этого комплекса входят буровая лебедка для подъема, спуска и подачи инструмента, буровые насосы, ротор, механизмы для приготовления и очистки бурового раствора, погрузочно-разгрузочных работ, обеспечением установки сжатым воздухом и пр. Основные (ротор, буровая лебедка и буровые насосы) и вспомогательные механизмы буровой установки

приводится в действие от силового привода, тип которого выбирают в зависимости от условия бурения, конструкции механизмов и других факторов.

На данной буровой установки используется привод на постоянном токе. Это объясняется значительно более высокой надежностью и долговечностью электропривода по сравнению с дизельным, а также значительно лучшими характеристиками электропривода (более высоким к.п.д. и перегрузочной способностью, удобством монтажа и демонтажа, простой кинематических схем, меньшей стоимостью эксплуатации, отсутствием необходимости доставки топлива на буровую).

На основании вышки установлен ротор, предназначенный для вращения бурильного инструмента, поддержания и вращения колонны бурильных и обсадочных труб при свинчивании и развинчивании. Для подъема и спуска бурильного инструмента и обсадных труб и передачи вращения ротору, используют буровую лебедку с приводными двигателями. Ее можно применять также при различных вспомогательных операциях особенно в случаи отсутствии специальной вспомогательной лебедки. Привод ротора можно осуществлять через карданный вала или цепную передачу от приводного вала лебедка. Возможен также индивидуальной привод ротора.

Буровые установки комплектуют автоматическим регулятором подачи долота, исполнительный двигатель которого кинематически связан с валом буровой лебедки. При эксплуатации бывают случаи, когда вследствие отсутствия электроэнергии, поломки приводных двигателей и других причин, для предотвращения прихвата инструмент поднимают аварийным приводом, функции которого исполнительный двигатель. Он получает питание от двигателя генератора, получающего в сваю очередь питание от другой электростанции.

В привышечных сооружениях установлены два буровых насоса с приводными двигателями, обеспечивающие подачу бурового раствора в скважину. Для снабжения установки сжатым воздухом служат компрессоры с приводными двигателями. Для торможения подъемного вала буровой лебедки в процессе спуска инструмента используется вспомогательный тормоз. Вспомогательные механизмы буровой установки – вибросито, кранбалка, водяной насос и др. оснащают индивидуальным электроприводом. Для перемещения и расстановки свечей имеется автомат спуска-подъема с электроприводами перемещения тележки и стрелы.

Аппаратура управления двигателями лебедки и буровых насосов смонтирована в станциях управления, которое управляется с пульта бурильщика.

#### Краткая характеристика объекта и применяемого электрооборудования

Буровая установка БУ-2500ЭУ предназначена для бурения эксплуатационных и разведочных скважин глубиной 2500 м при Весе 1 м бурильной трубы 300 Н

Установка состоит из вышечного, насосного, компрессорного блоков и циркуляционной системы. Основание вышечного блока предназначено для установки на нем вышки, буровой лебедки, Ротора, коробки передач, электропривода лебедки и ротора, вспомогательной лебедки, ключа АКБ-ЗМ2, приспособления для крепления и перепуска неподвижного конца талевого каната. Масса блока 120 т.

Насосный блок включает в себя два насоса с электродвигателями МПЭ-500-500 ЗУХЛЗ-М для привода насосов, станции управления электродвигателями и высоковольтное распределительное устройство всей буровой установки.

В компрессорный блок входят две компрессорные станции, пульт управления, воздухоосушитель и два воздухосборника.

Компрессорная установка предназначена для получения сжатого воздуха, осушки и очистки его и передачи по трубопроводам в систему пневматического управления буровой установки. блока.

Таким образом, основное и вспомогательное оборудование буровой установки расположено на металлических основаниях и перевозится с точки на точку в собранном виде на специальных гусеничных тяжеловозах, что в значительной степени сокращает сроки монтажа установки. Крепления блоков между собой, элементов манифольда, трубопроводов на блоках и в местах стыковки имеют быстроразъемные соединения и компенсаторы длины. В отдельных случаях установка может разбираться и перевозиться универсальным транспортом.

Кинематическая схема установки обеспечивает простоту конструкции и оперативность управления механизмами. В соответствии с принятой схемой лебедка и ротор могут приводиться в движение от одного электродвигателя мощностью 550 кВт, через электромагнитную муфту ЭМС-750, цепную передачу и коробку передач. При отключении электроэнергии бурильные трубы на безопасную высоту можно поднимать при помощи аварийного вспомогательного привода, работающего от резервной дизельной электростанции.

Буровые насосы, компрессоры, вибросита, вспомогательная лебедка, имеют самостоятельные индивидуальные приводы.

На данной буровой установке источником питания является дизельная электростанция.

Вторым (резервным) независимым источником является тоже дизельная электростанция, имеющая достаточную мощность для проведения аварийных работ (аварийный подъем бурильной колонны и т.п.).

Режим работы электродвигателей буровой лебедки в процессе подъемных операций является повторно-кратковременным, так как после каждого подъема колонны на одну свечу выполняются вспомогательные операции – отвинчивание, перенос и установка свечи и опускание незагруженного элеватора. Время подъема колонны на одну свечу называют рабочим периодом двигателя t<sup>p</sup>.

Во время вспомогательных операций t<sup>в</sup> двигатель лебедки, либо отключается от сети, либо работает с небольшой нагрузкой.

Для выполнения подъемных операций электродвигатель лебедки должен обеспечивать подъем максимально возможного груза на крюке. Максимальную ввозную нагрузку на крюке от массы всей колонны бурильных труб называют номинальной грузоподъемностью буровой установки и обозначают Q<sub>H</sub>. При этом мощность электродвигателя в кВт, необходимая для подъема колонны весом Q<sub>H</sub> в кН со скоростью V в м/с, можно определить по формуле:

$$\boldsymbol{P}_{no\partial} = \frac{\boldsymbol{Q}_{\mu} \times \boldsymbol{V}}{\eta} , \qquad (3.1.1)$$

где η - к.п.д. подъемной системы от вала электродвигателя до крюка;

V – установившаяся скорость подъема при номинальной нагрузке.

Если выбрать номинальную мощность двигателя Р<sub>н</sub> по формуле, т.е. Р<sub>н</sub> = Р<sub>под</sub>,, то в рабочие периоды при Q=Q<sub>н</sub> двигатель будет нагружен до номинальной мощности.

Однако при Q < Q<sub>н</sub> или при выполнении вспомогательных операций двигатель будет недогружен.

При этом средняя нагрузка на двигатель будет значительно ниже номинальной мощности электродвигателя, и двигатель будет недоиспользован по мощности.

Для полного использования мощности электродвигателя в процессе подъемных операций необходимо учесть повторно-кратковременный характер нагрузки на крюке. Для этого вычисляют эффективную (среднеквадратичную) мощность нагрузки по выражению.

$$\boldsymbol{P}_{_{\scriptscriptstyle SKE}} = \frac{\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{Q}_{_{\scriptscriptstyle H}} \times \boldsymbol{U}_{_{\scriptscriptstyle KPO}}}{\eta_{_{\scriptscriptstyle MEX}}} \sqrt{\frac{\boldsymbol{t}_{_{\scriptscriptstyle n}}}{\boldsymbol{t}_{_{\scriptscriptstyle n}} + \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{t}_{_{\scriptscriptstyle e}}}}, \qquad (3.1.2)$$

где с – коэффициент, учитывающий уменьшение веса труб при подъеме (0,9)

η<sub>мех</sub> – механический к.п.д. передачи от двигателя до крюка (0,7÷0,75)

t<sub>п</sub> – время подъема 1 свечи, сек

t<sub>в</sub> – время вспомогательной операции за цикл подъема

полной свечи  $t_{\text{B}} = 40$  с, если имеется АСП, без АСП  $-t_{\text{B}} = 100$  с.

β - коэффициент, учитывающий ухудшения условий

охлаждения двигателя при его остановках (0,5).

Если двигатель имеет принудительное охлаждение или вращается во время цикла, а включение нагрузки осуществляется муфтами, то α = 1.

Выбранный двигатель должен удовлетворять условию P<sub>экв</sub>  $\leq$  P<sub>н</sub>.

На буровой установке БУ-2500ЭУ применяется буровая лебедка типа БУ-125Э. Выбираем электродвигатель для приведения ее в движение.

Предварительно рассчитаем мощность двигателя по формуле:

$$\boldsymbol{P}_{\partial n} = \frac{\boldsymbol{Q}_{H} \times \boldsymbol{U}_{KPO}}{\eta_{ny} \lambda}, \qquad (3.1.3)$$

$$P_{\partial \pi} = \frac{2000 \times 0.2}{0.7 \times 1.25} = 457 \text{ kBm}$$

Из условия Рдл ≤ Рн, выбираем асинхронный двигатель АКБ-13-62-8.

Таблица 3.1 Технические характеристики АД.

Тип	Рн, кВт	Uн, кВ	η	cos φ
АКБ-13-62-8	550	6	0,93	0,87

Делаем проверку выбранного двигателя методом эквивалентной мощности:

$$\boldsymbol{P}_{_{\mathcal{J}K\mathcal{B}}} = \frac{\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{Q}_{_{\!H}} \times \boldsymbol{U}_{_{\!K\!P\!O}}}{\eta_{_{M\!e\!x}}} \sqrt{\frac{\boldsymbol{t}_{_{n}}}{\boldsymbol{t}_{_{n}}} + \beta \times \boldsymbol{t}_{_{\!\!\!\!\!\mathcal{G}}}}};$$

Зная длину свечи и скорости подъема, определяем время подъема на высоту одной свечи

l = 25 м

$$t_n = l/V_{npo};$$
 (3.1.4)

$$t_n = 25/0, 2 = 125 c$$

Так как буровая установка БУ-2500ЭУ не снабжена механизмами АСП, то t  $_{\scriptscriptstyle B}$  = 100 с.

$$P_{_{_{3Ke}}} = \frac{0.9 \times 2000 \times 0.2}{0.72} \sqrt{\frac{125}{125 + 0.5 \times 40}} = 425 \text{ kBT}$$

Выбранный двигатель удовлетворяет условию  $P_{\mbox{\tiny экв}} \leq P_{\mbox{\tiny н}}$ 

425 кВт < 550 кВт.

Среднегодовая нагрузка на валу двигателя Р = 385 кВт

Рассчитываем потери активной мощности АД  $\Delta P_a$ , кВт:

$$\Delta P_{a} = P \times \frac{1 - \eta}{\eta}, \qquad (3.1.5)$$

где Р – среднегодовая нагрузка на валу двигателя, кВт;

η - к.п.д. двигателя

$$\Delta P_{a} = 385 \times \frac{1 - 0.93}{0.93} = 30 \text{ kBT}$$

Определяем потери активной мощности второго двигателя Ра, кВт:

$$\Delta P_{a2} = p \times \frac{1 - \eta}{\eta}, \qquad (3.1.6)$$
  
$$\Delta P_{a2} = 385 \times \frac{1 - 0.92}{0.92} = 33.5 \text{ KBT}$$

Внесем результаты полученных расчетов в таблицу и определим степень экономичности выбранного электродвигателя.

# Таблица 3.2

Покаратали	Ед.	Обознач	Истолици	АКБ-13-
показатели	ИЗМ.	ение	источник	62-8
1	2	3	4	5
Номинальная мощность	кВт	Рном	Исх.данные	550
Нагрузка на валу	кВт	Р	Исх.данные	385
Коэф.нагр-ки		K₃	Р/Р <sub>ном</sub>	0,7
дв-ля				
Суммарный коэф. отчислений	-	р	Исходные данные	0,225
КПД	%	η	Каталог	0,93
Коэф. мощности		cosφ	Каталог	0,87
Потери акт. мощности	кВт	ΔΡ	Каталог	30
Нормальн. коэф. эффективности		P×U	Исх. данные	0,15

#### 3.1.2. Выбор преобразователя частоты.

Выбор преобразователя частоты производим исходя из условий:

$$I_{_{6bl}u,nu} \ge I_{_{1H}}; \tag{3.1.7}$$

$$U_{BUX,NY} \ge U_{1H}; \tag{3.1.8}$$

Условиям (2.2) и (2.3) удовлетворяет преобразователь частоты VSI - CX4A2N0. Это устройство предназначено для плавного пуска и экономичного регулирования производительности путем изменения частоты вращения приводного электродвигателя. При этом исключаются 6-7 кратные пусковые токи, уменьшается воздействие на сеть, сохраняется высокое значение КПД буровой установки и двигателя во всем диапазоне работы.

Экономичное регулирование производительности обеспечивается изменением частоты вращения приводного электродвигателя с помощью устройства VSI - CX4A2N0 (далее ПЧ).

ПЧ позволяет регулировать в широких пределах значения частоты, тока и напряжения на статоре асинхронного двигателя.

ПЧ серии VSI преобразует параметры электрической энергии питающей сети 380 В, 50 Гц в систему трёхфазных токов регулируемых напряжения и частоты для питания цепей статора АД.

ПЧ серии VSI представляет собой двухблочный преобразователь частоты: первый блок – диодный мост преобразует переменное напряжение в однонаправленное, пульсирующее. Далее напряжение фильтруется в промежуточной цепи на емкостном фильтре и поступает на блок преобразователя В переменное напряжение на IGBT-транзисторах. IGBT-преобразователь подает трехфазное симметричное переменное напряжение регулируемой амплитуды и частоты на электродвигатель. Мощность, которую преобразователь потребляет из сети, является почти полностью активной.

Блок сопряжения и управления электродвигателем основан на программируемом микропроцессоре. Микропроцессор управляет электродвигателем на основе полученных данных измерений, установленных параметров и сигналов управления, приходящих с управляющей панели и I/O платы. В свою очередь блок сопряжения и управления управляет цепью СИФУ, которая выдает требуемые управляющие импульсы на IGBT-транзисторы. Усилитель усиливает управляющие импульсы, поступающие с СИФУ на IGBT-транзисторы.

Основные параметры устройства VSI -7,5 СХ4А2N0 приведены в табл. З.З.

$T_{\alpha} \delta_{\pi}$	22
Гаол.	J.J.

Наименование параметра	Величина
Номинальная выходная мощность ПЧ, кВт	7,5
Номинальный ток нагрузки, А	18
Номинальное напряжение на входе, В	380(+10%-15%)
Диапазон регулирования напряжения, В	0 — Uсети
Частота питающей сети, Гц	50±5%
Диапазон регулирования частоты, Гц	0,5 – 60
Коэффициент мощности в номинальном режиме, не менее	0,94
Кратность тока перегрузки	1,5Іном

Блок сопряжения и управления электродвигателем предназначен для реализации функций управления, регулирования, защиты, автоматизации и обеспечения надёжной работы электропривода, с обеспечением следующих возможностей:

> формирование импульсов управления ПЧ по заданным алгоритмам работы управляемого выпрямителя и инвертора тока;

- автоматическое формирование процессов пуска и отключения ПЧ, а также формирование команд управления выключателями как на входе ПЧ, так и на выходе и шунтирующим ПЧ выключателем в тех случаях, когда предусмотрен режим переключения АД на непосредственное питание от сети;
- регулирование выходной частоты ПЧ по сигналам технологического регулятора, а также в режиме ручного управления;
- отображение информации о режимах работы, неисправностях и причинах аварийного отключения ПЧ;

автоматическое формирование обобщённых сигналов о состоянии ПЧ и их передачу на диспетчерский пульт.

# 3.1.3. Выбор токоограничивающего реактора.

Выбираем токоограничивающий реактор из условия:

$$I_{TOPHOM} \geq I_{1H};$$

(3.1.9)

Выбираем реактор: РТСТ – 41.

Параметры:

- номинальный ток 41 A;
- индуктивность 0,763·10⁻³ Гн;
- активное сопротивление 0,0708 Ом.

#### 3.1.4. Расчет общего сопротивления цепи.

$$R_0 = 2 \cdot R_{\varphi_{.A,\mathcal{I}}} + R_{\gamma_{H}} + R_{\gamma_{B}} + 2 \cdot R_{TOP}; (3.1.10)$$

где  $R_{TOP}$  – активное сопротивление токоограничивающего реактора;  $R_{\gamma H}$  – коммутационное сопротивление инвертора;  $R_{YB-}$  коммутационное сопротивление выпрямителя;

 $R_{AP}$  – активное сопротивление дросселя;

*RФАД* – активное сопротивление фазы синхронного двигателя.

*Активное сопротивление токоограничивающего реактора РТСТ-41: R*<sub>TOP</sub>=0,0708 Ом;

Активное сопротивление фазы асинхронного двигателя:

*RФ.АД***=0,607** Ом;

Коммутационное сопротивление выпрямителя определим по формуле:

$$R_{\gamma_B} = \frac{m \cdot X_{TOP}}{2 \cdot \pi}; \tag{3.1.11}$$

где m – пульсность схемы (m = 6);

 $X_{TOP}$  – индуктивное сопротивление токоограничивающего реактора:

$$X_{TOP} = 2 \cdot \pi \cdot f_C \cdot L_{TOP}; \qquad (3.1.12)$$

где  $f_C$  – частота питающей сети;

*L*<sub>ТОР</sub> – индуктивность токоограничивающего реактора.

Тогда:

$$X_{TOP} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,763 \cdot 10^{-3} = 0,24$$
 Ом;  
 $R_{\gamma_B} = \frac{6 \cdot 0,24}{2 \cdot \pi} = 0,229$  Ом.

Коммутационное сопротивление инвертора:

$$R_{\gamma_{H}} = \frac{m \cdot X_{C}}{2 \cdot \pi}; \qquad (3.1.13)$$

где  $X_{\rm C}$  – сверхпереходное сопротивление асинхронного двигателя:

$$X_{C} = \frac{U_{1\phi}}{\lambda_{i} \cdot I_{1H}} = \frac{380}{\sqrt{3 \cdot 5, 5 \cdot 10, 3}} = 1,71 \text{ Om};$$
$$R_{\gamma_{II}} = \frac{6 \cdot 2,574}{2 \cdot \pi} = 2,458 \quad \text{Om};$$

$$R_0 = 2 \cdot 0,607 + 0,229 + 2,458 + 2 \cdot 0,0708 = 4,043 \quad \text{Om}.$$

$$L_0 = 2 \cdot L_{\phi_{.A,II}} + 2 \cdot L_{TOP};$$
(3.1.14)

где *LФ*.*АД* – индуктивное сопротивление фазы синхронного двигателя; *LтOP* – индуктивное сопротивление токоограничивающего реактора.

$$L_{\Phi.AII} = 7 \cdot 10^{-3}$$
 Гн;

$$L_0 = 2 \cdot 0,007 + 2 \cdot 0,000763 = 15,526 \cdot 10^{-3}$$
 Гн.

# 3.1.5. Расчет электромеханической и электромагнитной постоянных времени.

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{\mathcal{P}} = \frac{L_0}{R_0} = \frac{0.015526}{4.043} = 0.0038 \text{ c};$$
 (3.1.15)

Коэффициент момента двигателя:

$$k_{M} = \frac{M_{H}}{I_{H} \frac{\pi}{\sqrt{6}}} = \frac{62}{10,3 \cdot 1,28} = 4,7 \text{ Hm/A};$$
(3.1.16)

Коэффициент ЭДС:

$$k_E = \frac{U_{\pi} \frac{3\sqrt{2}}{\pi}}{\omega_0} = \frac{380 \cdot 1,35}{105} = 4,89 \text{ B c/pag};$$
 (3.1.17)

Коэффициент передачи двигателя по управлению:

$$k_{\mathcal{A}} = \frac{1}{k_E} = \frac{1}{4,89} = 0,204 \text{ pag/B c;}$$
 (3.1.18)

Механическая постоянная времени:

$$T_{M} = \frac{J_{0}R_{0}}{k_{E}k_{M}} = \frac{0.2 \cdot 4.043}{4.89 \cdot 4.7} = 0.035 \,\mathrm{c};$$
(3.1.19)

Коэффициент усиления тиристорного преобразователя:  $U_d = U_{d\max} \cdot \cos\alpha; \qquad (3.1.20)$ 

$$U_{d\max} = U_{2Amp} \cdot 1,35; \tag{3.1.21}$$

$$K_{mn} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y} = \frac{380,295 - 220,235}{3,978 - 2,2} = 90$$
(3.1.22)

# 3.2. Расчет статических и динамических характеристик разомкнутой системы.

Определим погрешность регулирования, исходя из основного уравнения динамики:

$$\omega = \frac{U_{\rm n}}{K_{\rm e}} - \frac{M_{\rm n}R_{\rm 0}}{K_{\rm e}K_{\rm m}} = \omega_{\rm 0} - \Delta\omega; \qquad (3.2.1)$$

Рассмотрим два случая:

1) M=0:

$$\omega_0 = \frac{U_d}{k_E} = \frac{380}{4,89} = 105 \text{ pag/c;}$$
(3.2.2)

2) M=M<sub>н</sub>:

$$\Delta \omega = \frac{M_H R_0}{k_E k_M} = \frac{62 \cdot 4,043}{4.89 \cdot 4,7} = 11 \text{ pag/c}; \tag{3.2.3}$$

Статизм характеристик:

верхней:

$$\Delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \cdot 100\% = \frac{11}{105} \cdot 100\% = 10,5\%; \qquad (3.2.4)$$

нижней:

$$\Delta^* = \frac{\Delta \omega \cdot D}{\omega_0} \cdot 100\% = \frac{11 \cdot 7}{105} \cdot 100\% = 73,5\%;$$
(3.2.5)

где D=7 – диапазон регулирования.

Составим структурная схему для моделирования разомкнутой системы:



Рис.3.2.1. Структурная схема разомкнутой системы

В результате моделирования были получены такие графики:



Рис.3.2.2. Переходной процесс по току в разомкнутой системе



Рис.3.2.3. Переходной процесс по скорости в разомкнутой системе

Статические характеристики в разомкнутой системе имеют вид:



Рис.3.2.4. Статические характеристики разомкнутой системы

#### 3.3. Расчет замкнутой системы по схеме с общим сумматором.

#### 3.3.1. Расчет жесткой обратной связи по скорости.



Структурная схема замкнутой системы приведена на рис. 3.1

Рис.3.3.1. Структурная схема замкнутой системы

Определим параметры жесткой ОС по скорости для системы стабилизации скорости в электроприводе преобразователь частоты – асинхронный двигатель, обеспечивающий погрешность регулирования 3% в диапазоне D=7.

В качестве датчика скорости используется тахогенератор постоянного тока типа: CT-22, с параметрами:

- номинальное напряжение 230В;
- номинальный ток якоря 0,2A;
- номинальная скорость 1000 об/мин;
- ток возбуждения 0,35 А;
- *R*<sub>я</sub>=42,3 Ом;

- *R*<sub>ов</sub>=127 Ом.

Тахогенератор был выбран с учетом условия:

$$\omega_{\rm HMP2} \ge \omega_{\rm Hde} \,. \tag{3.3.1}$$

Коэффициент усиления тахогенератора:

$$K_{m^2} = \frac{U_{TT}}{\omega_{TT}} = \frac{230}{105} = 2,19 \text{ Bc/pa};$$
(3.3.2)

Требуемый коэффициент усиления замкнутой системы:

$$K_{mp} = \frac{\Delta_p \cdot D}{\Delta_s^*} - 1 = \frac{10, 5 \cdot 7}{3} - 1 = 23, 5 \text{ A.}$$
(3.3.4)

Коэффициент делителя напряжения:

$$K_{\partial H} = \frac{K_{mp}}{K_{mn} \cdot K_{\partial} \cdot K_{m2}} = \frac{23,5}{90 \cdot 0,204 \cdot 2,19} = 0,585;$$
(3.3.5)

Так как коэффициент делителя напряжения меньше единицы, то на входе тиристорного преобразователя электронный усилитель не требуется. Сопротивление делителя напряжения:

$$R_{\mathcal{A}H} \ge \frac{U_{TT}}{I_{TT}} = \frac{230}{0.2} = 1150 \text{ Om}; \tag{3.3.6}$$

В качестве ДН принимаем проволочный резистор с сопротивлением *R*=1,2 кОм. Тогда:

$$r_{\partial h} = R_{\mathcal{A}H} K_{\mathcal{A}H} = 1200 \cdot 0,585 = 702 \text{ Om.}$$
(3.3.7)

## 3.3.2 Ограничение форсировок замкнутой системы.

Коэффициент усиления системы по управляющему воздействию:

$$K_{3}^{\mathcal{YB}} = \frac{K_{mn}K_{\partial}}{1 + K_{mn}K_{\partial}K_{m2}K_{\partial H}} = \frac{90 \cdot 0.204}{1 + 90 \cdot 0.204 \cdot 2.19 \cdot 0.585} = 0.749;$$
(3.3.8)

Напряжение задания замкнутой системы:

$$U_{_{3_{sc}}} = \frac{\omega_0}{K_{_3}^{_{ye}}} = \frac{105}{0,749} = 140,19 \text{ B};$$
(3.3.9)

Напряжение задания разомкнутой системы:

$$U_{_{_{3_{pc}}}} = \frac{\omega_0}{K_{_{mn}}K_{_{\partial}}} = \frac{105}{90 \cdot 0,204} = 5,72 \,\mathrm{B};$$
(3.3.10)

Коэффициент форсировки по напряжению:

$$K_{\phi opc} = \frac{U_{_{3_{sc}}}}{U_{_{3_{pc}}}} = \frac{140,19}{5,72} = 24,5.$$
(3.3.11)

Таким образом, входной узел должен выдерживать 25-кратную форсировку, вместо допустимой двукратной, и должен быть защищен. Ограничение форсировки осуществим путем шунтирования суммирующего узла налинейным элементом типа «ограничение», который реализуется в виде двух встречно включенных стабилитронов, напряжение пробоя которых выбирается на уровне:

 $U_{ynp \max} \le K_{\phi opc. \partial on} \cdot U_{3_{3C}} = 2 \cdot 5,72 = 11,44 \text{ B}.$ 

Исходя из этого, выбираем 2 стабилитрона серии КС147А с уровнем нечувствительности 10 В.

# 3.3.3 Статический расчет токовой отсечки.

Выполним статический расчет системы содержащей обратную связь по скорости и по току с отсечкой. В качестве датчика тока используется датчик активного типа, содержащий измерительный шунт и промежуточный усилитель.

Общий вид датчика тока показан на рис.3.3.2.



Рис.3.3.2. Общий вид датчика тока

Найдем коэффициент усиления датчика тока:

$$K_{\partial m} = \frac{U_A}{I_{\text{max}}} = \frac{10}{20,6} = 0,485 \,\text{B/A},$$
 (3.3.12)

где  $I_{\text{max}} = 2I_{H\partial} = 20,6$  А.

Выбираем ток отсечки и ток упора.

$$I_{omc} = 1, 2I_{u\partial} = 1, 2 \cdot 10, 3 = 12, 36 \text{ A};$$
 (3.3.13)

$$I_{\nu n} = 2I_{\mu \partial} = 2.10, 3 = 20, 6 \text{ A.}$$
 (3.3.14)

Расчет уставки нечувствительности нелинейного элемента включенного на выход ДТ:

$$U_{02} = I_{omc} \cdot K_{\partial m} = 12,36 \cdot 0,485 = 6 \text{ B.}$$
(3.3.15)

НЭ реализуется двумя встречно включенными стабилитронами с напряжением пробоя  $U_{_{npob}} = 6$  В.

Напряжение преобразователя в режиме стопорения привода с максимальной скорости (остаточное напряжение тиристорного преобразователя в режиме упора):

$$U_{ocmTTI} = I_{yn} \cdot R_0 = 20,6 \cdot 4,043 = 83,29 \text{ B}$$
(3.3.16)

Соответствующее напряжение на входе электронного усилителя равно:

$$U_{yocm} = \frac{U_{ocmTII}}{K_{mn}} = \frac{83,29}{90} = 0,925 \text{ B.}$$
(3.3.17)

Требуемый максимальный сигнал обратной связи по току при упоре с максимальной скорости:

$$U_{ocm} = U_{3_{vc}} - U_{yocm} = 10 - 0,925 = 9,075 \text{ B};$$
(3.3.18)

Приращение выхода датчика тока в период действия токовой отсечки:

$$\Delta U_{\partial m} = (I_{yn} - I_{omc}) K_{\partial m} = (20, 6 - 12, 36) \cdot 0,485 = 4 \text{ B};$$
(3.3.19)

Требуемый коэффициент обратной связи по току реализуется потенциометрическим делителем, скоммутированным на выходе нелинейного элемента:

$$K_{ocm} = \frac{U_{ocm}}{\Delta U_{\partial m}} = \frac{9,075}{4} = 2,269; \qquad (3.3.20)$$

Поскольку *К*<sub>ocr</sub>>1, значит необходимо в цепь обратной святи по току, после потенциометрического делителя включить электронный усилитель с *Кэу*=10:

$$K_{ocm} = \frac{U_{ocm}}{\Delta U_{\partial m} \cdot K_{oy}} = \frac{9,075}{4 \cdot 10} = 0,227; \qquad (3.3.21)$$

Сопротивление делителя напряжения выберем равным Rдн=10 кОм, тогда:

$$r_{\mathcal{A}H} = R_{\mathcal{A}H} \cdot K_{ocm} = 2,27 \text{ KOm};$$
 (3.3.22)

#### 3.4. Определение устойчивости системы

Составим упрощенную структурную схему замкнутой системы:



Рис.3.4.1. Упрощенная структурная схема замкнутой системы

Передаточная функция по управляющему воздействию:

TA TA

$$W_{3}^{ye} = \frac{\frac{K_{mn}K_{\partial}}{(T_{n}p+1)(T_{3}T_{M}p^{2}+T_{M}p+1)}}{1+K_{mz}K_{\partial n}\frac{K_{mn}K_{\partial}}{(T_{n}p+1)(T_{3}T_{M}p^{2}+T_{M}p+1)}} = \frac{K_{mn}K_{\partial}}{T_{3}T_{M}T_{n}p^{3}+p^{2}(T_{M}T_{n}+T_{3}T_{M})+p(T_{n}+T_{M})+(1+K_{mz}K_{\partial n}K_{mn}K_{\partial})} = (3.4.1)$$
$$= \frac{183.6}{0.0000133p^{3}+0.000483p^{2}+0.045p+24.522}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0,000483 & 24,522 \\ 0,00000133 & 0,045 \end{vmatrix} = -0,0000109 < 0$$

Так определитель ∆<0, то система неустойчива.

Разделим характеристическое уравнение системы на ао:

 $p^{3} + 363,158 p^{2} + 33834,586 p + 18437593,98$ b1=363,158; b2=33834,586; b3=18437593,98.  $M = \frac{b_{1}}{\sqrt[3]{b_{3}}} = \frac{363,158}{\sqrt[3]{18437593,98}} = 1,37$   $N = \frac{b_{2}}{\sqrt[3]{b_{3}^{2}}} = \frac{33834,586}{\sqrt[3]{18437593,98^{2}}} = 0,0052$ (3.4.2)

Коэффициентом передаточной функции по управляющему воздействию при р<sup>3</sup> пренебрегаем и разделим её числитель со знаменателем на свободный член знаменателя:

$$W_{_{3}}^{_{\mathcal{Y}^{\theta}}} = \frac{183.6}{0,000483\,p^{2} + 0.045\,p + 24.522} = \frac{7.487}{0,00002\,p^{2} + 0.0018\,p + 1};$$
(3.4.3)

*α=*0,00002; *β*=0,0018.

Частота ожидаемых колебаний:

$$\Omega = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} = \frac{1}{\sqrt{0,00002}} = 223,607\,\Gamma\mathrm{u};\tag{3.4.4}$$

Коэффициент затухания:

$$\varepsilon = \frac{\beta}{2\sqrt{\alpha}} = \frac{0,0018}{2\sqrt{0,00002}} = 0,201; \tag{3.4.5}$$

Угол нагрузки:

$$\varphi = \arcsin \sqrt{1 - \varepsilon^2} = \arcsin \sqrt{1 - 0.201^2} = 78,4^{\circ}.$$
 (3.4.6)

Тогда аналитическое выражение графика переходного процесса в относительных единицах будет иметь вид:

$$\omega^{*}(t) = 1 - \frac{1}{\sin \varphi} e^{-\varepsilon \cdot \Omega t} \sin(\sqrt{1 - \varepsilon^{2}} \Omega t + \varphi) = 1 - 1,021 \cdot e^{-46,32t} \cdot \sin(219.04t + 78,4^{\circ})$$



Рис.3.4.2. График переходного процесса по скорости в относительных единицах, полученный аналитически

Структурная схема замкнутой системы по схеме с общим сумматором представлена на рис.3.4.3.



Рис.3.4.3. Структурная схема замкнутой системы с общим сумматором

Переходные процесс в замкнутой системе по схеме с общим сумматором имеют следующий вид:



Рис.3.4.4. Переходной процесс по скорости в замкнутой системе по схеме с

общим сумматором



Рис.3.4.5. Переходной процесс по току в замкнутой системе по схеме с общим сумматором

Статические характеристики в замкнутой системе по схеме с общим сумматором имеют вид:



Рис3.4.6. Статические характеристики в замкнутой системе по схеме с общим сумматором

#### 3.5. Расчёт системы подчинённого регулирования

### 3.5.1. Расчёт обратной связи по току и регулятора тока.

Оптимизация производится для обеспечения в замкнутой системе показателей приближенных к заданным. Необходимо до минимума снизить постоянную времени электропривода. Для этого задаемся масштабным множителем Тµ=0,04 с, который не влияет на форму переходного процесса и служит обобщенной мерой быстродействия системы. Регуляторы реализованы на УБСР-АИР с унифицированным выходом датчика 10 В.

Коэффициент обратной связи по току:

$$K_{\partial m} = \frac{U_a}{I_{dn}} = \frac{10}{10,3} = 0,97 \,\mathrm{B/A}; \tag{3.5.1}$$

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$K_{\partial c} = \frac{U_a}{\omega_0} = \frac{10}{105} = 0,095 \text{ B} \text{ c/pag;}$$
 (3.5.2)

Так как  $T_{M} > 4T_{\Im}$ , то допустим условный разрыв внутренней обратной связи по противо-ЭДС, тогда передаточная функция будет иметь вид:

$$W_{om}(p) = \frac{K_{mn}K_{\partial m}}{R_0(T_{\ni}p+1)};$$
(3.5.3)

Поскольку модульный оптимум имеет большее быстродействие, синтез регулятора тока ведется по модульному оптимуму:

$$W_{pm}^{MO}(p) = \frac{3H(0)}{4uc\pi(0) \cdot 2T_{\mu}p} = \frac{R_0(T_{\Im}p+1)}{K_{mn}K_{\partial m}2T_{\mu}p} = \frac{4,043 \cdot 0,0038 \cdot p}{90 \cdot 0,97 \cdot 2 \cdot 0,004 \cdot p} + \frac{4,043}{90 \cdot 0,97 \cdot 2 \cdot 0,004 \cdot p} = \frac{5,78}{p} + 0,022$$
(3.5.4)

Регулятор тока имеет пропорционально-интегральную структуру, принципиальная схема реализации имеет вид (рис.3.5.1):



Рис.3.5.1. Принципиальная схема регулятора тока

Значения сопротивлений и емкостей рассчитаны по формулам:

$$\frac{R_0}{R_1} = \Pi; (3.5.5)$$

$$\frac{1}{R_1 C_0} = U; (3.5.6)$$

$$R_T = R_1;(3.5.7)$$

примем Со=1мкФ, тогда:

$$R_{1} = R_{T} = \frac{1}{5,78 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 170 \text{ кОм};$$
$$R_{0} = 0,0022 \cdot 170 \cdot 10^{3} = 0,374 \text{ кОм},$$

где R<sub>т</sub> – согласующий резистор, если используются элементы с различными унифицированными выходами.

## 3.5.2 Расчёт обратной связи по скорости и регулятора скорости.

Статизм регулятора скорости, синтезируемого по модульному оптимуму:

$$\Delta_{_{3}}^{*} = \Delta_{_{p}} D \frac{2T_{_{\mu c}}}{T_{_{\mathcal{M}}}} = 10,5 \cdot 7 \cdot \frac{2 \cdot 0,004}{0,035} = 16,8\%.$$
(3.5.8)

Поскольку статизм замкнутой системы по модульному оптимуму не удовлетворяет поставленному заданию, синтезируем регулятор на симметричный оптимум.

$$W_{pc}^{co}(p) = \frac{T_{\mathcal{M}}K_{E}K_{\partial m}(4T_{\mu c}p+1)}{8T_{\mu c}^{2}R_{0}K_{\partial c}p} = \frac{0.035 \cdot 4.89 \cdot 0.97(4 \cdot 0.004 \cdot p+1)}{8 \cdot 0.004^{2} \cdot 4.043 \cdot 0.095 \cdot p} = 53,69 + \frac{3356,13}{p}$$
(3.5.9)

Передаточная функция фильтра, устанавливаемого на вход системы:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{4T_{\mu\nu}p+1} = \frac{1}{0,016p+1}.$$
(3.5.10)

Принципиальная схема регулятора скорости представлена на рис.3.5.2.



Рис.3.5.2. Принципиальная схема регулятора скорости

Коэффициенты усиления регулятора:

$$\frac{R_0}{R_1} = 53,69;$$
$$\frac{1}{R_1C_0} = 3356,13;$$

Приняв *С0*=1мкФ и *R1=Rф* получим

$$R_{1} = \frac{1}{3356,13 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 297,96 \text{ Ом};$$
$$R_{0} = 297,96 \cdot 53,69 = 16 \text{ кОм};$$
$$C_{\phi} = 45 \text{ пФ}.$$

#### 3.5.3 Расчет задатчика интенсивности

Одно из средств токоограничения пользуются подачей в схему задающего напряжения не скачком, а в виде нарастающего трапециидального сигнала, причем темп роста этого сигнала может быть определен, например, по условию непревышения динамического тока максимально допустимого. Устройство реализующее такой закон управления носит название задатчик интенсивности (ЗИ).

$$\Delta t = \frac{J_0 \omega_0}{2I_{\mu} K_{\mu}} = \frac{0.2 \cdot 105}{2 \cdot 10.3 \cdot 4.7} = 0.22 \text{ сек.}$$
(3.5.11)

# 3.5.4 Составление структурной схемы

Структурная схема системы подчиненного регулирования будет иметь вид показанный на рис.3.5.3



Рис.3.5.3. Структурная схема замкнутой системы подчиненного регулирования

Переходные процессы в системе подчиненного регулирования будут иметь вид:



регулированием



Рис.3.5.5. Переходной процесс по току в системе с подчиненным регулированием

Статические характеристики в системе подчиненного регулирования с регулятором скорости, синтезированным по модульному оптимуму, имеют следующий вид:



Рис.3.5.6. Статические характеристики в системе подчиненного регулирования с регулятором скорости, синтезированным по модульному оптимуму

Статические характеристики в системе подчиненного регулирования с регулятором скорости, синтезированным по модульному оптимуму, имеют следующий вид:



*Рис.3.5.7. Статические характеристики в системе подчиненного регулирования с регулятором скорости, синтезированным по симметричному оптимуму* 

3.6. Разработка узлов электрической защиты электропривода

Защиты электропривода должны обеспечивать заданное быстродействие, обладать точностью и надежностью, быть селективными.

## 3.6.1 Защита от короткого замыкания

Защита от короткого замыкания (максимальная токовая защита) представлена либо автоматами с электромагнитным расцепителем, либо предохранителями. Возможна защита от короткого замыкания двумя реле максимального тока, одновременно защищающих двигатель от чрезмерно больших бросков тока. при длительном режиме работы защита от перегрева, вызванного перегрузкой по току осуществляется с помощью автоматов с тепловым расцепителем.



Рис3.6.1. Принципиальная схема возможной реализации защиты АД

Ток уставки реле тока выбирается следующим образом:

Іуст=(1.1÷1.3)Іпуск.

Поскольку пусковой ток равен *I*<sub>пуск</sub>= 56,65 А, то ток уставки реле будет равняться *I*<sub>уст</sub>= 68 А. Выбираем предохранитель марки ПР2, исполнение 2, *I*<sub>н</sub>= 25 А. Предохранители оперативной цепи выбираем НПН2-60, номинальный ток – 6 А.

#### 3.6.2 Защита от самозапуска или нулевая защита

Нулевая защита ( от чрезмерного понижения и исчезновения напряжения) осуществляется с помощью линейных контакторов отключающих схему. При востановлении питания автоматический повторный запуск невозможен. Если в пусковой схеме присутствует команда контролер, данный вид защиты отключая схему разрешает повторный запуск только при установке команда контролера в исходное нулевое положение.

# 3.7. Составление принципиальной схемы привода

Общая принципиальная схема электропривода типа ПЧ-АД с управлением по системе подчиненного регулирования с применением ряда различных защит двигателя и системы управления имеет следующий вид.



Рис.3.7.1. Принципиальная схема привода

#### Выводы

АД имеет параметры: Рн=550 кВт. К системе были предъявлены следующие требования:

- статизм на нижней характеристике регулирования:  $\Delta^* \le 3\%$ ;

перерегулирование: δ 6%;

- время регулирования: t<sub>p</sub>=0,12 сек.

В первую очередь были расчитаны статические и механические характеристики разомкнутой системы и получены следующие результаты:

- статизм на нижней характеристике регулирования:  $\Delta^* = 73,5\%$ ;

- кратность пускового тока: I<sub>п</sub>/I<sub>н</sub>=10;

- время регулирования: t<sub>P</sub>=0,25 сек.

Так как значения статизма и пускового тока не удовлетворили заданного условия, то был проведен расчёт замкнутой системы с общим сумматором. В качестве датчика скорости использовался тахогенератор, а в качестве датчика тока – шунт.

Схема с общим сумматором позволила получить следующие статические и динамические характеристики:

- статизм на нижней характеристике регулирования:  $\Delta^* = 6,67\%$ ;
- кратность пускового тока: Іл/Ін=1,2;
- время регулирования: t<sub>p</sub>=0,9 сек.

Схема с общим сумматором эффективно ограничивала ток, но значения статизма и время регулирования все же несколько превышали заданные.

Расчёт системы подчинённого регулирования проводился для обеспечения показателей, близких к заданным. Для этого использовался масштабный множитель  $T_{\mu}$ . Система подчинённого регулирования складывается из регуляторов тока и скорости. Поскольку  $T_M > 4T_3$ , синтез регулятора тока проводился на модульный оптимум, т.к. он имеет лучшее быстродействие. В результате был получен регулятор ПИ-структуры.

Регулятор скорости был синтезирован на симметричный оптимум, т.к. статизм системы (16,9%) все еще не удовлетворял заданному. В результате был получен регулятор ПИ-структуры.

Для ограничения тока в системе используется задатчик интенсивности со временем нарастания сигнала 0,22 с.

При моделировании системы с подчиненным регулированием были получены следующие результаты: ток и скорость устанавливаются на уровне номинальных, пусковой ток не превышает максимально заданного, время регулирования практически соответствует заданному.

В системе были применены защиты от: короткого замыкания и превышения током допустимой величины.

# Глава 4

Анализ динамических режимов электроприводов роторного стола в системе «ЭЛЕКТРОПРИВОД-КБТ».



#### 4.1 Анализ режимов пуска в системе «ЭЛЕКТРОПРИВОД-КБТ».

При исследовании процесса пуска в модели принимались начальные и граничные условия. Процесс пуска модели электропривода, совместно с КБТ осуществляется путем подачи напряжения на соответствующие входы усилителей в модели электропривода.

Для асинхронного двигателя записывались величины:

 $M_{_{\partial 6}}(t), \omega_{_{\partial 6}}(t)$  - момент и скорость на валу двигателя или же момент и скорость КБТ в верхнем сечении.

Для КБТ записывались следующие величины:

 $\varphi(t)$  - угол закручивания колонны;

 $\omega_{10}(t)$  - скорость вращения колонны;

 $M_1(t) \div M_{10}(t)$  - зависимости от времени моментов в середине каждого из участков, на которые разделена КБТ при моделировании (нумерация участков и соответствующих индексов момента идет от устья скважины к забою).

Графики переходных процессов пуска системы электропривода вхолостую, при поднятом над забоем долоте представлены на рис. В системе имеется отрицательная обратная связь по скорости, что позволяет в некоторой степени стабилизировать скорость вращения всей КБТ, при изменении статистической нагрузки.

Как видно из графика, по мере разгона колонны момент двигателя плавно возрастает. Угол закручивания изменяется плавно и его установившееся значениесоставляет  $0.208\varphi_{don}$ . При холостом вращении КБТ момент на валу двигателя составляет -  $0,76M_H$  рис.







# 4.2 Анализ режимов наброса нагрузки на долото в системе «ЭЛЕКТРОПРИВОД-КБТ».

Процесс приложения нагрузки к вращающемуся вхолостую долоту иллюстрируется графиками на рис. рассматривается гипотетический случай, когда нагрузка на долоте возрастает скачком и остается далее постоянной по величине.

Скачкообразный наброс постоянной нагрузки на долото приводит к колебательному изменению его скорости. На рис5,6 представлены графики, иллюстрирующие приложение на долото скачкообразной нагрузки 12 кНм. На рис представлены графики наброса нагрузки на долото для глубины 5000м в системе АД – КБТ.

При работе двигателя на естественной характеристике, наброс нагрузки величиной 12 кНм на долото является аналогичным процессу В КБТ прихвата долота. кривых моментов сечениям по  $M_1(t) \div M_{10}(t)$  появляются перерегулирования значительной величины, которые оказывают свое влияние на величину момента двигателя  $M_{\partial s}(t)$ . Кривая  $M_{\partial e}(t)$ имеет максимум, который соответствует величине критического момента асинхронного двигателя. Двигатель «опрокидывается», и его скорость подает до нуля. При заторможенном двигателе напряжения в сечениях КБТ остаются равными величине приложенного момента нагрузки. Угол закручивания возрастает, но его установившееся значение не превышает допустимых пределов и составляет  $0.44 \varphi_{don}$ . Рис5,668

#### 4.3 Анализ режимов сброса нагрузки на долоте в системе "Электропривод -

КБТ"

В процессе бурения скважин часто имеет место изменение нагрузки на долоте в сторону ее уменьшения. Такое изменение обуславливается переходом от бурения твердой породы к бурению более магкой породы или отрыву долота от забоя. Такие режимы скачкообразного снижения нагрузки на долоте воспроизводились в модели КБТ путем снижения постоянного напряжения на входе интеграторе воспроизводящего величину.

Снижение нагрузки c16 до 8 кНм для различных систем электроприводов при глубине бурения 5000 и отображениы на осциллограммах риc5.12 а

Снижение нагрузки на долоте в начальный момент вызывает скачкообразное увеличение скорости долота  $\omega_{10}(t)$  и снижение момента  $M_{10}(t)$ . Такое изменение параметров вызывает колебательный характер изменения величины  $\omega_{de}(t)$  и  $M_{de}(t)$ . При срыве долота рис 5.12 момент в нижнем сечении КБТ  $M_{10}(t)$  резко падает и кратковременно может даже приобретать отрицательные значения. Скорость двигателя  $\omega_{de}(t)$  и момент  $M_{de}(t)$  после некоторых колебаний достигают своих значений холостого хода после сравнительно небольшого промежутка времени. В кривой угла закручивания также появляются незначительные колебания.

# Анализ переходных режимов приложения пульсирующей нагрузки на долото в системе «Электропривод-КБТ».

Экспериментальные исследования характера изменения момента нагрузки на долоте, позволили установить, что в ряде случаев изменения  $M_H(t)$  носит пульсирующий характер. В этом случае кривая  $M_H(t)$  с достаточной степенью точности может быть аппроксимирована синусоидой со срезанными отрицательными полуволнами. Такой закон изменения  $M_H(t)$  определяется, по-видимому, периодическими изменением продольной нагрузки на долоте, обусловленными главным образом продольными колебаниями КБТ и реактивным характерам сил, воздействующих на долото. Так как при неизмененном направлении вращения знак реактивной силы не может изменяться.

Были проведены исследования электропривода при воздействии на долото пульсирующей нагрузки для различных амплитудных значений моментов нагрузки, при различных глубинах бурения. Рассматривались режимы приложения на долото пульсирующей нагрузки с частотой  $f = 4\Gamma u$ и амплитудой пульсации  $M_{H \max} = 8,0\kappa Hm$ 

#### Рис.5/13 5.14

Приложение к долоту пульсирующей нагрузки вызывает колебания скорости долота  $\omega_{10}(t)$  и момента в нижнем сечении  $M_{10}(t)$ . Амплитудное значение скорости долота в данном случае существенно больше, что объясняется меньшим диаметром КБТ, но амплитуда момента  $M_{10}(t)$ -меньше. Как видно из данного графика, пульсации момента на долоте практически не отражаются на работе электропривода рис. 5.14

#### Анализ режимов прихвата колонны в системе «Электропривод-КБТ».

Под прихватом колонны понимается скачкообразное изменение момента сухого трения, обусловленное обрушением стенки скважины. В модели прихват колонны имитировался путем подачи на вход интегратора, воспроизводящего величину  $\tilde{\omega}_g(t)$  дополнительного постоянного напряжения, что эквивалентно увеличению момента в начале 9-го сечения. Ввиду сложности введения с достаточной точностью ненулевых начальных значений большого числа переменных, моделирование процесса прихвата осуществлялось непосредственно после моделирования соответствующего процесса пуска. Рассматривались случаи увеличения нагрузки на валу двигателей всех систем в результате прихвата при моменте прихвата  $M_{\eta n} = 8\kappa H M.$  рис. 5.156

При бурении на 5000 м долото в остановленном состоянии находится значительно дольшее время, чем требуется для возвращения обратной волны к забою. Такое затягивание времени переходного процесса объясняется низкой скоростью вращения КБТ. Все величины, характеризующие динамику электропривода, в данном случае изменяются плавно, без всяких колебаний и перерегулирований.

# Анализ режимов прихвата долота в системе «Электропривод-КБТ».

Под прихватом долота подразумевается процесс скачкообразноого увеличения нагрузки на долоте до такой величины, под действием которой после окончания переходного процесса вся система приходит в неподвижное состояние.

#### Список использованной литературы

1. Башарин А.В. Автоматизация производства. - Львов. - 1979

 Башарин А.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. – Львов: Энергоатомиздат. – 1990

 Ильинский Н.Ф Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. - М.: Энергоиздат. – 1981

Ильинский Н.Ф. Автоматизированный электропривод, силовые полупроводниковые приборы, преобразовательная техника. – М.: Энергоатомиздат. – 1983

Поздеев А. Динамика вентильного привода постоянного тока. - М.:
 Энергоатомиздат. – 1987

Справочник по преобразовательной технике/ Под общей редакцией С.
 Чиженко. - К.: Техніка. – 1978

7. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами. - М.: Высшая школа, 1979.

- Иванов К.И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966.
- Супрун Ю.И. Установка бурильная УБШ 501 АК: Руководство по эксплуатации. – Кривой Рог: НИПИрудмаш, 2002.
- 3. Самохин Ф.И. Горная электротехника. М.: Недра, 1972. 384 с.

- Донченко А.С. Справочник механика рудной шахты. М.: Недра, 1978. 583 с.
- Методические указания к курсовому проектированию по теории электропривода / Родькин Д. И., Величко Т. В., Каневский В. В., Захаров В. Ю., Осадчук Ю. Г. – Кривой Рог, 2002 - 30 с.
- 6. Ключев В.И. Выбор электродвигателей для производственных механизмов.
   М.: Госэнергоиздат, 1960.
- Чиликин М.Г. Основы автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1974. – 568 с.
- 8. Башарин А.В. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат,1982 392 с.